



TUGAS AKHIR - TF141581

**PERHITUNGAN *STRESS-STRAIN*
PADA SAMBUNGAN *DRILL PIPE*
PENGEBORAN BAWAH LAUT
SAAT *SPUDDING IN* DAN *DRILLING*
DENGAN MENGGUNAKAN
METODE ELEMEN HINGGA**

OKTAFAINA

NRP. 0231 1645 000 028

Dosen Pembimbing

Ir. Yerri Susatio, M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA

Fakultas Teknologi Industri

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2018



FINAL PROJECT - TF141581

**STRESS-STRAIN CALCULATIONS
ON DRILL PIPE CONNECTIONS
UNDERWATER DRILLING
DURING SPUDDING IN AND DRILLING
USING FINITE ELEMEN METHOD**

OKTAFAINA

NRP. 0231 1645 000 028

Advisor Lecturer

Ir. Yerri Susatio, M.T.

DEPARTMENT OF ENGINEERING PHYSICS

Faculty of Industrial Technology

Sepuluh Nopember Institute of Technology

Surabaya

2018

LEMBAR PENGESAHAN

PERHITUNGAN *STRESS-STRAIN* PADA SAMBUNGAN *DRILL PIPE* PENGEBORAN BAWAH LAUT SAAT *SPUDDING IN* DAN *DRILLING* MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

TUGAS AKHIR

Oleh:

Oktafaina

NRP. 0231 1645 000 028

Surabaya, 12 Juli 2018

Mengetahui

Pembimbing



Ir. Yerri Susatio, M.T.

NIP.19541017 198003 1 005



Kepala Departemen
Teknik Fisika FTI-ITS

Agus Muhammad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D.

NIP: 19780902 200312 1 002

LEMBAR PENGESAHAN

PERHITUNGAN *STRESS-STRAIN* PADA SAMBUNGAN *DRILL PIPE* PENGEBORAN BAWAH LAUT SAAT *SPUDDING IN* DAN *DRILLING* MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

TUGAS AKHIR


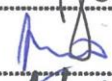

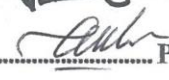
Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh
Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Vibrasi dan Akustik
Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

Oktafaina

NRP. 0231 1645 000 028

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

- | | | |
|---|---|-------------|
| 1. Ir. Yerri Susatio, M.T. |  | Pembimbing |
| 2. Ir. Wiratno Argo Asmoro, M.Sc. |  | Penguji I |
| 3. Ir. Heri Joestiono, M.T |  | Penguji II |
| 4. Dr. rer. nat. Ir. Aulia M.T.Nasution, M.Sc |  | Penguji III |

Surabaya, July 2018

PERHITUNGAN STRESS-STRAIN PADA SAMBUNGAN DRILL PIPE PENGEBORAN BAWAH LAUT SAAT SPUDDING IN DAN DRILLING MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

Nama Mahasiswa : Oktafaina
NRP : 02311645000028
Jurusan : Teknik Fisika, FTI - ITS
Dosen Pembimbing : Ir. Yerri Susatio, M.T.

ABSTRAK

Drill pipe merupakan salah satu komponen pengeboran bawah laut yang berfungsi untuk memperpanjang rangkaian pengeboran. Drill pipe akan disambung satu demi satu hingga drill bit menyentuh dasar laut. Setelah menyentuh dasar laut drill pipe akan diberikan torsi. Di dalam proses pengeboran bawah laut terdapat gaya eksternal berupa tekanan air laut yang mengenai rangkaian pengeboran. Pemberian torsi dan tekanan air laut mengakibatkan terjadinya stress dan strain pada sambungan-sambungan drill pipe.

Pada penelitian ini dilakukan analisa stress dan strain pada setiap sambungan drill pipe dengan dua variasi yaitu, variasi diameter drill pipe dan variasi panjang drill pipe dimana setiap variasi terdapat 3 jenis grade drill pipe yang akan dibandingkan. Untuk perhitungannya menggunakan menggunakan metode elemen hingga.

Dari hasil penelitian didapatkan nilai stress dan strain drill pipe terkecil berdasarkan variasi panjang pipa saat spudding in terdapat pada drill pipe yang mempunyai panjang pipa 44,5 feet yaitu grade S-135 dengan nilai stress translasi pada node 20 sebesar $2,401 \times 10^{10}$ dan strain translasi pada node 20 sebesar 0,120. Sedangkan nilai stress dan strain terkecil berdasarkan variasi diameter pipa saat drilling terdapat pada drill pipe dengan grade V-150 yang memiliki nilai stress translasi pada node 20 sebesar $-5,277 \times 10^9$ dan strain translasi pada node 20 sebesar -0,026

Kata kunci : Elemen Hingga, Drill Pipe, Stress, Strain

STRESS-STRAIN CALCULATIONS ON DRILL PIPE CONNECTIONS UNDERWATER DRILLING DURING SPUDDING IN AND DRILLING USING FINITE ELEMENT METHOD

Name : Oktafaina
NRP : 02311645000028
Department : Teknik Fisika, FTI-ITS
Advisor Lecturer : Ir. Yerri Susatio, M. T.

ABSTRACT

Drill pipe is one component of underwater drilling that serves to extend the drilling sequence. Drill pipe will be connected one by one until the drill bit touches the seabed. After touching the seabed drill pipe will be given torque. In the process of underwater drilling there is an external force in the form of seawater pressure on the drilling sequence. Torsion and seawater pressure result in stress and strain on drill pipe connections.

In this research, stress and strain analysis on each drill pipe connection with two variations are variation of diameter drill pipe and variation of drill pipe length where each variation there are 3 types of drill pipe grade which will be compared. For calculations use the finite element method.

From the research results obtained the smallest stress and strain at the time of spudding in based on drill pipe length variation of S-135 grade with the value of stress translation at node 20 of 2.401×10^{10} and translational strain at node 20 of 0.120. While the value of stress and the smallest strain based on pipe diameter variation when drilling found on the drill pipe with grade V-150 which has the value of translation stress and translational strain of -5.277×10^9 and -0.026

Keyword: Finite Element, Drill Pipe, Stress, Strain

KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirabbil'alamin, segala puji kami panjatkan kepada Allah atas limpahan nikmat dan atas segala karunia-Nya yang telah diberikan kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir beserta laporannya dengan judul **“Perhitungan Stress-Strain Pada Sambungan Drill Pipe Pengeboran Bawah Laut saat Spudding In dan Drilling dengan Menggunakan Metode Elemen Hingga”**.

Dalam menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini, tidak terlepas dari bantuan, dukungan, doa dan bimbingan baik secara langsung maupun tidak langsung dari beberapa pihak sehingga laporan ini dapat terselesaikan dengan baik. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Kedua Orang tua saya yang selalu memberikan doa dan semangat kepada penulis tak henti-hentinya.
2. Bapak Agus Muhammad Hatta, ST, M.Si, Ph.D selaku kepala Departemen Teknik Fisika ITS.
3. Dosen pembimbing saya, Pak **Yerri**, yang selalu membimbing saya dengan sangat sabar dan atas nasehat - nasehat kajiannya kepada saya untuk tidak gampang menyerah
4. Bapak Ir. Wiratno Argo Asmoro, M.Sc selaku Kepala Laboratorium Vibrasi dan Akustik Teknik Fisika ITS
5. Dosen wali saya, Pak **Purwadi**, beliau telah membimbing saya di 4 semester ini dan memberikan masukan dan nasehatnya kepada saya
6. Teman-temanku uni, ghia, anggun yang telah memberikan dukungan, semangat dan doanya.
7. Teman – teman seperjuangan Tugas Akhir di bidang minat Vibrasi dan Akustik fidia, ayu, ilvy, inces, nadiyah makasih guys udah numpangin aku di lab kalian :3
8. Teman-teman seperjuangan TA LJ TF'16

Dalam penyusunan laporan tugas akhir ini, penulis menyadari bahwa masih terdapat kekurangan baik dari materi maupun teknik

penyajianya. Oleh karena itu segala saran serta masukkan yang membangun sangat penulis harapkan demi perbaikan dan kemajuan dalam tugas akhir ini. Semoga Allah SWT melimpahkan rahmat dan berkah-Nya kepada kita semua dan semoga laporan tugas kahir ini dapat bermanfaat bagi para pembacanya.

Surabaya, 4 Juni 2018

Penulis

DAFTAR ISI

ABSTRAK	ix
ABSTRACT	xi
KATA PENGANTAR.....	xiii
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xxiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan.....	3
1.5 Sistematika Laporan	3
BAB II TEORI PENUNJANG	5
2.1 Drill Pipe	5
2.2 Momen Inersia.....	6
2.3 Gaya Eksternal yang Mengenai Drill Pipe	7
2.4 Metode Elemen Hingga.....	9
2.4.1. Elemen Beam Uniform.....	10
2.4.2. Beam Dengan Beban Terdistribusi.....	15
2.5 Frekuensi Natural dan Eigen Value.....	16
2.6 Matriks Massa	17
2.7 Stress dan Strain	19
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	21
3.1 Pengumpulan Data Drill Pipe	22
3.2 Perhitungan Matriks Kekakuan Lokal	23
3.3 Perhitungan Matriks Kekakuan Global	24
3.4 Perhitungan Gaya dan Momen	25
3.5 Menentukan Syarat Batas	25
3.6 Perhitungan Displacement.....	27

3.7.	Perhitungan Stress-Strain	28
3.8.	Pemodelan Drill Pipe Menggunakan ANSYS	28
3.8.1.	Desain Drill Pipe	28
3.8.2.	Engineering Data	29
3.8.3.	Pemodelan Struktur Drill Pipe.....	30
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN		33
4.1	Variasi Diameter <i>Drill Pipe</i>	33
4.1.1.	Frekuensi Natural	33
4.1.2.	<i>Drill Pipe</i> dengan Grade S-135	36
4.1.3.	<i>Drill Pipe</i> dengan Grade V-150	39
4.1.4.	<i>Drill Pipe</i> dengan Grade Z-140	42
4.1.5.	<i>Stress-Strain</i> dengan Grade S-135.....	47
4.1.6.	<i>Stress-Strain</i> dengan Grade V-150	53
4.1.7.	<i>Stress-Strain</i> dengan Grade Z-140	59
4.2.	Variasi Panjang <i>Drill Pipe</i>	67
4.2.1.	Frekuensi Natural	68
4.2.2.	<i>Drill Pipe</i> dengan Grade S-135	71
4.2.3.	<i>Drill Pipe</i> dengan Grade G-105.....	74
4.2.4.	<i>Drill Pipe</i> dengan Grade Z-140	79
4.2.5.	<i>Stress-Strain</i> dengan Grade S-135.....	84
4.2.6.	<i>Stress-Strain</i> dengan Grade G-105	90
4.2.7.	<i>Stress-Strain</i> dengan Grade Z-140	98
4.3.	Perbandingan dengan dan Tanpa Beban Tekanan Air Laut	109
4.4.	Verifikasi Hasil.....	112
BAB V PENUTUP		117
5.1	Kesimpulan.....	117
5.2	Saran	117
DAFTAR PUSTAKA.....		118
BIODATA PENULIS.....		121

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Silinder Berongga	6
Gambar 2. 2 Elemen Zat Cair Statis (Sutrisno, n.d.)	8
Gambar 2. 3 <i>Beam dengan Penampang Uniform</i>	10
Gambar 2. 4 Skematik Beban Tarik Menghasilkan Elongasi dan Regangan Linier (William D.Callister, 2014)	20
Gambar 3. 1 Diagram Alir Tugas Akhir	21
Gambar 3. 2 Desain <i>Drill String</i> (Plisga, 2005)	22
Gambar 3. 3 Pendefinisian Tiap Elemen Matriks pada <i>Software Mathcad</i>	23
Gambar 3. 4 Matriks Kekakuan Global	24
Gambar 3. 5 Perhitungan Gaya dan Momen pada Mathcad	25
Gambar 3. 6 <i>Drill Pipe</i> Kondisi <i>Spudding In</i>	26
Gambar 3. 7 <i>Drill Pipe</i> Kondisi <i>Drilling</i>	27
Gambar 3. 8 Penghilangan Node Mati	27
Gambar 3. 9 Outline Simulasi ANSYS	29
Gambar 3. 10 Desain <i>Drill Pipe</i> Satu Elemen	29
Gambar 3. 11 <i>Propertise</i> dari Material <i>Structural Steel</i>	30
Gambar 3. 12 Tampilan <i>Drill Pipe</i> Setelah <i>Meshing</i>	31
Gambar 3. 13 Pemodelan <i>Drill Pipe</i> 1 elemen saat <i>Spudding In</i>	31
Gambar 4. 1 Frekuensi Natural <i>Drill Pipe</i> Grade S-135 Variasi Diameter	33
Gambar 4. 2 Frekuensi Natural <i>Drill Pipe</i> Grade V-150 Variasi Diameter	34
Gambar 4. 3 Frekuensi Natural <i>Drill Pipe</i> Grade Z-140 Variasi Diameter	34
Gambar 4. 4 Perbandingan Frekuensi Natural <i>Drill Pipe</i> Variasi Diameter	35
Gambar 4. 5 <i>Displacement</i> Translasi <i>Spuding In</i> Grade S-135	36
Gambar 4. 6 <i>Displacement</i> Rotasi <i>Spudding In</i> Grade S-135	37
Gambar 4. 7 <i>Displacement</i> Rotasi <i>Drilling</i> Grade S-135	38
Gambar 4. 8 <i>Displacement</i> Translasi <i>Drilling</i> Grade S-135	38

Gambar 4. 9 <i>Displacement</i> Translasi <i>Spudding In</i> Grade V-150	39
Gambar 4. 10 <i>Displacement</i> Rotasi <i>Spudding In</i> Grade V-150	40
Gambar 4. 11 <i>Displacement</i> Translasi <i>Drilling</i> Grade V-150	41
Gambar 4. 12 <i>Displacement</i> Rotasi <i>Drilling</i> Grade V-150	41
Gambar 4. 13 <i>Displacement</i> Translasi <i>Spudding In</i> Grade Z-140	42
Gambar 4. 14 <i>Displacement</i> Rotasi <i>Spudding In</i> Grade Z-140	43
Gambar 4. 15 <i>Displacement</i> Rotasi <i>Drilling</i> Grade Z-140	44
Gambar 4. 16 <i>Displacement</i> Translasi <i>Drilling</i> Grade Z-140	44
Gambar 4. 17 Perbandingan <i>Displacement</i> Translasi <i>Spudding in</i> Variasi Diameter	45
Gambar 4.18 Perbandingan <i>Displacement</i> Translasi <i>Drilling</i> Variasi Diameter	46
Gambar 4.19 <i>Stress</i> Translasi <i>Drill Pipe</i> Grade S-135 saat <i>Spudding In</i>	47
Gambar 4.20 <i>Stress</i> Rotasi <i>Drill Pipe</i> Grade S-135 saat <i>Spudding</i> <i>In</i>	48
Gambar 4.21 <i>Strain</i> Translasi <i>Drill Pipe</i> Grade S-135 saat <i>Spudding In</i>	49
Gambar 4.22 <i>Strain</i> Rotasi <i>Drill Pipe</i> Grade S-135 saat <i>Spudding</i> <i>In</i>	49
Gambar 4.23 <i>Stress</i> Translasi <i>Drill Pipe</i> Grade S-135 saat <i>Drilling</i>	50
Gambar 4.24 <i>Stress</i> Rotasi <i>Drill Pipe</i> Grade S-135 saat <i>Drilling</i>	51
Gambar 4.25 <i>Strain</i> Translasi <i>Drill Pipe</i> Grade S-135 saat <i>Drilling</i>	52
Gambar 4.26 <i>Strain</i> Rotasi <i>Drill Pipe</i> Grade S-135 saat <i>Drilling</i>	52
Gambar 4.27 <i>Stress</i> Translasi <i>Drill Pipe</i> Grade V-150 saat <i>Spudding In</i>	53
Gambar 4. 28 <i>Stress</i> Rotasi <i>Drill Pipe</i> Grade V-150 saat <i>Spudding</i> <i>In</i>	54

Gambar 4. 29 <i>Stress Translasi Drill Pipe Grade V-150 saat Drilling</i>	55
Gambar 4. 30 <i>Stress Rotasi Drill Pipe Grade V-150 saat Drilling</i>	55
Gambar 4. 31 <i>Strain Translasi Drill Pipe Grade V-150 saat Spudding In</i>	56
Gambar 4. 32 <i>Strain Rotasi Drill Pipe Grade V-150 saat Spudding In</i>	57
Gambar 4. 33 <i>Strain Translasi Drill Pipe Grade V-150 saat Drilling</i>	58
Gambar 4. 34 <i>Strain Rotasi Drill Pipe Grade V-150 saat Drilling</i>	58
Gambar 4. 35 <i>Stress Translasi Drill Pipe Grade Z-140 saat Spudding In</i>	59
Gambar 4. 36 <i>Stress Rotasi Drill Pipe Grade Z-140 saat Spudding In</i>	60
Gambar 4. 37 <i>Stress Translasi Drill Pipe Grade Z-140 saat Drilling</i>	61
Gambar 4. 38 <i>Stress Rotasi Drill Pipe Grade Z-140 saat Drilling</i>	61
Gambar 4. 39 <i>Strain Translasi Drill Pipe Grade Z-140 saat Spudding In</i>	62
Gambar 4. 40 <i>Strain Rotasi Drill Pipe Grade Z-140 saat Spudding In</i>	63
Gambar 4. 41 <i>Strain Translasi Drill Pipe Grade Z-140 saat Drilling</i>	64
Gambar 4. 42 <i>Strain Rotasi Drill Pipe Grade Z-140 saat Drilling</i>	64
Gambar 4. 43 <i>Perbandingan Stress Translasi Drill Pipe saat Spudding In Variasi Diameter</i>	65
Gambar 4. 44 <i>Perbandingan Stress Translasi Drill Pipe saat Drilling Variasi Diameter</i>	65
Gambar 4. 45 <i>Perbandingan Strain Translasi Drill Pipe saat Spudding In Variasi Diameter</i>	66

Gambar 4. 46 Perbandingan <i>Strain</i> Translasi <i>Drill Pipe</i> saat <i>Drilling</i> Variasi Diameter	67
Gambar 4. 47 Frekuensi Natural <i>Drill Pipe</i> Grade S-135 dengan Variasi Panjang	68
Gambar 4. 48 Frekuensi Natural <i>Drill Pipe</i> Grade G-105 dengan Variasi Panjang	69
Gambar 4. 49 Frekuensi Natural <i>Drill Pipe</i> Grade Z-140 dengan Variasi Panjang	70
Gambar 4. 50 Perbandingan Frekuensi Natural <i>Drill Pipe</i> dengan Variasi Panjang	71
Gambar 4. 51 <i>Displacement</i> Translasi <i>Spudding In</i> Grade S-135	72
Gambar 4. 52 <i>Displacement</i> Rotasi <i>Spudding In</i> Grade S-135	72
Gambar 4. 53 <i>Displacement</i> Rotasi <i>Drilling</i> Grade S-135	73
Gambar 4. 54 <i>Displacement</i> Translasi <i>Drilling</i> Grade S-135	74
Gambar 4. 55 <i>Displacement</i> Translasi <i>Spudding In</i> Grade G-105	75
Gambar 4. 56 <i>Displacement</i> Rotasi <i>Spudding In</i> Grade G-105	76
Gambar 4. 57 <i>Displacement</i> Rotasi <i>Drilling</i> Grade G-105	77
Gambar 4. 58 <i>Displacement</i> Translasi <i>Drilling</i> Grade G-105	78
Gambar 4. 59 <i>Displacement</i> Translasi <i>Spudding In</i> Grade Z-140	79
Gambar 4. 60 <i>Displacement</i> Rotasi <i>Spudding In</i> Grade Z-140	80
Gambar 4. 61 <i>Displacement</i> Rotasi <i>Drilling</i> Grade Z-140	81
Gambar 4. 62 <i>Displacement</i> Translasi <i>Drilling</i> Grade Z-140	82
Gambar 4. 63 Perbandingan <i>Displacement</i> Translasi <i>Spudding In</i> Variasi Panjang	83
Gambar 4. 64 Perbandingan <i>Displacement</i> Translasi <i>Drilling</i> Variasi Panjang	83
Gambar 4. 65 <i>Stress</i> Translasi <i>Drill Pipe</i> Grade S-135 saat <i>Spudding In</i>	84
Gambar 4. 66 <i>Stress</i> Rotasi <i>Drill Pipe</i> Grade S-135 saat <i>Spudding</i> <i>In</i>	85

Gambar 4. 67 <i>Strain Translasi Drill Pipe Grade S-135 saat Spudding In</i>	86
Gambar 4. 68 <i>Strain Rotasi Drill Pipe Grade S-135 saat Spudding In</i>	86
Gambar 4. 69 <i>Stress Translasi Drill Pipe Grade S-135 saat Drilling</i>	87
Gambar 4. 70 <i>Stress Rotasi Drill Pipe Grade S-135 saat Drilling</i>	88
Gambar 4. 71 <i>Strain Translasi Drill Pipe Grade S-135 saat Drilling</i>	89
Gambar 4. 72 <i>Strain Rotasi Drill Pipe Grade S-135 saat Drilling</i>	90
Gambar 4. 73 <i>Stress Translasi Drill Pipe Grade G-105 saat Spudding In</i>	91
Gambar 4. 74 <i>Stress Rotasi Drill Pipe Grade G-105 saat Spudding In</i>	92
Gambar 4. 75 <i>Stress Translasi Drill Pipe Grade G-105 saat Drilling</i>	93
Gambar 4. 76 <i>Stress Rotasi Drill Pipe Grade G-105 saat Drilling</i>	94
Gambar 4. 77 <i>Strain Translasi Drill Pipe Grade G-105 saat Spudding In</i>	95
Gambar 4. 78 <i>Strain Rotasi Drill Pipe Grade G-105 saat Spudding In</i>	96
Gambar 4. 79 <i>Strain Translasi Drill Pipe Grade G-105 saat Drilling</i>	97
Gambar 4. 80 <i>Strain Rotasi Drill Pipe Grade G-105 saat Drilling</i>	98
Gambar 4. 81 <i>Stress Translasi Drill Pipe Grade Z-140 saat Spudding In</i>	99
Gambar 4. 82 <i>Stress Rotasi Drill Pipe Grade Z-140 saat Spudding In</i>	100
Gambar 4. 83 <i>Stress Translasi Drill Pipe Grade Z-140 saat Drilling</i>	101

Gambar 4. 84 <i>Stress Rotasi Drill Pipe Grade Z-140 saat Drilling</i>	102
Gambar 4. 85 <i>Strain Translasi Drill Pipe Grade Z-140 saat Spudding In</i>	103
Gambar 4. 86 <i>Strain Rotasi Drill Pipe Grade Z-140 saat Spudding In</i>	104
Gambar 4. 87 <i>Strain Translasi Drill Pipe Grade Z-140 saat Drilling</i>	105
Gambar 4. 88 <i>Strain Rotatif Drill Pipe Grade Z-140 saat Drilling</i>	106
Gambar 4. 89 Perbandingan <i>Stress Translasi saat Spudding In</i> dengan Variasi Panjang	107
Gambar 4. 90 Perbandingan <i>Stress Translasi saat Drilling</i> dengan Variasi Panjang	107
Gambar 4. 91 Perbandingan <i>Strain Translasi saat Spudding In</i> Variasi Panjang	108
Gambar 4. 92 Perbandingan <i>Strain Translasi saat Drilling</i> Variasi Panjang	109
Gambar 4. 93 Respon Simpangan <i>drill pipe</i> Panjang 32 ft bahan <i>Stainless Steel</i> Tanpa Tekanan Air Laut	110
Gambar 4. 94 Respon Simpangan <i>drill pipe</i> Panjang 32 ft bahan <i>Stainless Steel</i> dengan Tekanan Air Laut	111
Gambar 4. 95 <i>Drill Pipe</i> dengan Satu Elemen	112
Gambar 4. 96 Gaya Reaksi Node 1 pada ANSYS	113
Gambar 4. 97 Momen Reaksi Node 1 pada ANSYS	113
Gambar 4. 98 <i>Displacement</i> Node 2 Simulasi ANSYS	114

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Spesifikasi Data <i>Drill Pipe</i> Variasi Diameter	22
Tabel 3. 2 Spesifikasi Data <i>Drill Pipe</i> Variasi Panjang	22
Tabel 4. 1 Perbandingan Nilai Matematis dan Simulasi	116

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Permintaan sumber daya alam seperti minyak dan gas semakin hari semakin meningkat dengan bertambahnya jumlah penduduk. Organisasi negara-negara pengeksplor minyak atau OPEC memperkirakan permintaan untuk minyak mentah akan lebih tinggi pada tahun 2018. Dalam laporan bulanannya, OPEC mengatakan bahwa permintaan minyak dunia akan meningkat 1,59 juta barel per hari (bph) pada tahun ini, naik 60.000 bph dari perkiraan sebelumnya (Rianti, 2018). Dengan data ini saja, banyak negara perlu mengikuti permintaan domestik dan globalnya. Untuk memenuhi permintaan tersebut maka diperlukan usaha untuk meningkatkan produktivitas minyak dan gas. Salah satu usahanya yaitu dengan cara mencari sumber minyak di daerah laut dalam.

Pada proses pengeboran di daerah laut dalam atau bawah laut, terdapat beberapa rangkaian pengeboran (*drill string*), salah satunya adalah *drill pipe*. *Drill pipe* adalah pipa baja yang sangat kuat yang berfungsi sebagai penghubung antara kelly (pipa yang bersegi) pada sistem *rotary table* atau top drive dengan peralatan yang ada dibawahnya seperti *drill collar*, *botom hole assembly* dan mata bor (*drill bit*) sebagai sarana untuk mentransfer putaran. Fungsi utama *drill pipe* adalah untuk memperpanjang rangkaian pengeboran (Wenda, 2012). *Drill pipe* akan disambung satu demi satu diatas platform hingga *drill bit* yang terletak paling bawah dari rangkaian pengeboran menyentuh dasar laut. Setelah mencapai dasar laut maka seluruh *drill string* akan diberikan torsi. Pemberian torsi tersebut akan mengakibatkan berputarnya seluruh *drill string* dan bergeseknya *drill bit* dengan dasar laut, yang kemudian akan membuat dasar laut terlubangi.

Dalam operasi bawah laut, masalah yang paling menantang untuk ditangani selama operasi adalah getaran dan *drill string*. Getaran *drill string* adalah penyebab utama kegagalan komponen *drill string*. Didalam pengeboran bawah laut, pengaruh tekanan, arus dan pasang surut air laut akan menghasilkan potensi kegagalan

yang sangat besar untuk *drill string* karena kelelahan (Batati, 2015).

Pada penelitian yang dilakukan oleh (Herwardinata, 2017) mengenai respon simpangan *drill pipe* dengan menggunakan metode elemen hingga, *drill pipe* digunakan sebagai media penyambung antara *Top Drive* dengan *drill bit*. *Drill pipe* dengan panjang sekitar 10 m disusun bertingkat dengan sambungan berupa ulir. Pada saat proses pengeboran, *drill pipe* akan diputar dengan torsi tertentu agar *drill bit* ikut berputar dan menggesek formasi. Hasil penelitian menunjukkan respon simpangan yang terjadi akibat pemberian torsi yaitu semakin kebawah respon simpangannya semakin kecil.

Tugas akhir ini akan melanjutkan penelitian yang telah dilakukan oleh Herwardinata. Pada penelitian ini dicari pengaruh tekanan air laut terhadap *stress* dan *strain* pada sambungan *drill pipe* dengan menggunakan metode elemen hingga.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka permasalahan dari Tugas Akhir ini, yaitu :

1. Bagaimana frekuensi natural pada *drill pipe* ?
2. Bagaimana pengaruh tekanan air laut terhadap *displacement* pada sambungan *drill pipe* ?
3. Bagaimana *stress* dan *strain* yang terjadi pada setiap sambungan *drill pipe* saat kondisi *spudding in* dan *drilling* ?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Tipe Rig yang digunakan bertipe semi-submersible dengan kedalaman 270 m
2. Kondisi Lingkungan yang dipertimbangkan adalah tekanan air laut
3. Pengaruh air laut dihitung secara laminar
4. Tidak mengkaji beban yang berasal dari internal pipa
5. Variabel yang dikontrol adalah variasi tipe pipa dengan perbedaan diameter dalam, diameter luar dan panjang pipa

1.4 Tujuan

Adapun tujuan yang ingin dicapai dari tugas akhir ini yaitu

1. Mencari frekuensi natural pada *drill pipe*
2. Mengetahui pengaruh tekanan air laut terhadap *stress* dan *strain* pada sambungan *drill pipe*
3. Menganalisa *stress* dan *strain* yang terjadi pada setiap sambungan *drill pipe* saat kondisi *spudding in* dan *drilling*

1.5 Sistematika Laporan

Sistematika laporan yang digunakan dalam penyusunan laporan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Berisi tentang latar belakang, perumusan masalah, batasan masalah, tujuan, dan sistematika laporan.

BAB II TEORI PENUNJANG

Berisi tentang teori yang menunjang yaitu teori tentang drill pipe, metode elemen hingga, elemen beam uniform, beam dengan beban terdistribusi, tegangan dan regangan dan gaya eksternal yang mengenai pipa.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Berisi tentang tahapan-tahapan yang dilakukan dalam penyelesaian Tugas Akhir yang meliputi langkah-langkah penelitian yang dituliskan dalam diagram alir dan langkah-langkah analisis yang dilakukan untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini.

BAB IV ANALISIS DATA

Berisi tentang hasil analisis dan pembahasan Tugas Akhir.

BAB V PENUTUP

Berisi tentang kesimpulan yang diperoleh dalam tugas akhir serta saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II

TEORI PENUNJANG

2.1 Drill Pipe

Drill pipe merupakan peralatan yang sangat penting dalam operasi pengeboran minyak dan gas. *Drill pipe* terbuat dari pipa baja yang sangat kuat dan didesain dengan sedemikian rupa untuk memberi kekuatan dalam proses pembuatan sumur pengeboran (*well*) minyak dan atau gas.

Drill pipe memiliki fungsi sebagai penghubung antara Kelly (pipa yang bersegi) pada sistem *rotary table* atau top drive dengan peralatan yang ada dibawahnya seperti *drill collar*, *bottom hole assembly* dan mata bor (*drill bit*) sebagai sarana untuk mentransfer putaran. Fungsi yang paling utama *drill pipe* dalam operasi pengeboran adalah untuk memperpanjang rangkaian pengeboran. Adapun fungsi lain dari *drill pipe* adalah sebagai laluan fluida pengeboran dari *surface* (permukaan) hingga ke *annulus*.

Salah satu yang dipertimbangkan dalam pemilihan *drill pipe* adalah dengan memperhatikan spesifikasinya berupa *size* (ukuran), *length* (panjang), *tool joint*, *nominal weight* (berat nominal), *grade* (tingkatan) dan *classification* (kelas).

1. Size (ukuran)

Size (ukuran) merupakan spesifikasi *drill pipe* yang mengacu pada pengukuran diameter luar (*Outside diameter/OD*), diameter dalam (*Inside Diameter/ID*) dan ketebalan (*thickness*).

2. Length (Panjang)

Drill pipe tersedia dalam beberapa ukuran panjang. Menurut API (*American Petroleum Institute*) panjang *drill pipe* ini distandarisasi dalam tiga range, yaitu :

- Range 1 : 18 feet sampai 22 feet
- Range 2 : 27 feet sampai 30 feet
- Range 3 : 38 feet sampai 45 feet

3. Tool Joint

Tool joint merupakan tempat dari ulir penyambung antara *drill pipe* yang satu dengan yang lainnya. Tool joint terdiri dari dua macam penyambung yaitu pin dan box, semua bagian penyambung

pada *drill string* disebut *rotary shoulder connection*, khusus penyambung pada batang-batang *drill pipe* disebut *tool joint*.

4. Nominal weight (Berat Nominal)

Nominal weight (Berat Nominal) merupakan berat rata-rata *drill pipe* per feet termasuk berat tool joint pada *drill pipe* dan berat nominal ini tidak menunjukkan berat *drill pipe* yang sebenarnya.

5. Grade (Tingkatan)

Drill pipe dibuat dengan tipe *seamless* dan kualitas bajanya ditunjukkan dengan grade. Angka yang menjadi simbol grade menunjukkan besarnya minimum yield strength yang dimiliki oleh *drill pipe* tersebut dalam ribuan psi (Susilo, 2004).

2.2 Momen Inersia

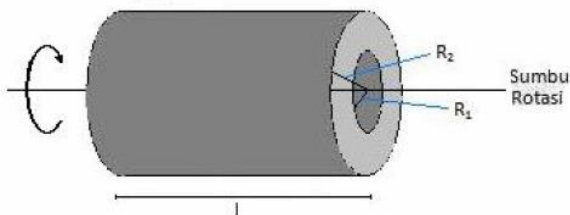
Secara umum, Momen Inersia setiap benda tegar bisa dinyatakan sebagai berikut :

$$I = \sum mr^2 \quad (2.1)$$

$$I = mr_1^2 + mr_2^2 + mr_3^2 + \dots + mr_n^2$$

Benda tegar bisa dianggap tersusun dari banyak partikel yang tersebar di seluruh bagian benda itu. Setiap partikel-partikel itu punya massa dan tentu saja memiliki jarak r dari sumbu rotasi. jadi momen inersia dari setiap benda merupakan jumlah total momen inersia setiap partikel yang menyusun benda itu.

Selain bergantung pada sumbu rotasi, Momen Inersia (I) setiap partikel juga bergantung pada massa (m) partikel itu dan kuadrat jarak (r^2) partikel dari sumbu rotasi.



Gambar 2. 1 Silinder Berongga

Untuk benda dengan bentuk silinder berongga seperti pada Gambar 2.1 momen inersia dapat dinyatakan dengan rumus :

$$I = \frac{1}{2}m(R_1^2 + R_2^2) \quad (2.2)$$

Dimana :

R_1 = jari – jari dalam pipa (m)

R_2 = jari – jari luar pipa (m)

I = momen inersia ($kg.m^2$)

m = massa benda (kg)

Massa benda dapat dicari menggunakan persamaan :

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (2.3)$$

Dimana :

ρ = massa jenis (kg/m^3)

v = volume benda (m^3)

Volume didapatkan dari volume pipa berongga (Hugh D.Young, 2002) yaitu :

$$v = \pi(R_2^2 - R_1^2)L \quad (2.4)$$

Dimana :

L = Panjang pipa (m)

R_2 = Jari-jari luar pipa (m)

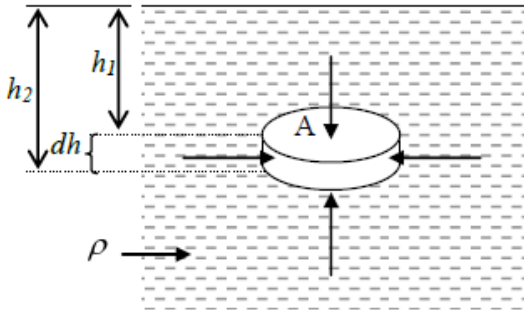
R_1 = Jari-jari dalam pipa (m)

2.3 Gaya Eksternal yang Mengenai Drill Pipe

Terdapat gaya eksternal yang mengenai *drill pipe* saat *spudding in* dan *drilling* yang dapat mempengaruhi getaran pada *drill pipe* itu sendiri. Gaya eksternal itu berasal dari tekanan air laut. Semakin kedalam, maka tekanan air laut semakin besar. Hal ini disebabkan oleh semakin besarnya gaya yang bekerja pada lapisan yang lebih dalam.

Tekanan hidrostatik adalah tekanan yang disebabkan oleh zat cair yang berada dalam kesetimbangan atau statis. Jika elemen zat

cair yang ditinjau dalam keadaan statis maka resultan gaya yang bekerja pada elemen itu nol kesegala arah. Resultan gaya pada arah horizontal yang disebabkan oleh tekanan zat cair di sekeliling elemen adalah nol, berarti tekanan zat cair untuk setiap titik pada kedalaman yang sama adalah sama besar.



Gambar 2. 2 Elemen Zat Cair Statis (Sutrisno, n.d.)

Resultan gaya pada arah vertical juga nol, dan itu disebabkan oleh selisih tekanan zat cair pada kedalaman h_1 di permukaan atas elemen yang luasnya A dan tekanan zat cair pada kedalaman h_2 di permukaan bawah elemen yang luasnya A , serta berat elemen zat cair itu yaitu $\rho g A dh$, sehingga dapat diperoleh

$$dpA = \rho g A dh \quad (2.5)$$

Persamaan diatas diintegrasikan sehingga persamaannya menjadi :

$$P_2 - P_1 = \rho g (h_2 - h_1) \quad (2.6)$$

yang berarti bahwa tekanan hidrostatik pada kedalaman h_1 dan h_2 berturut-turut adalah $P_1 = \rho g h_1$ dan $P_2 = \rho g h_2$, atau tekanan pada sebuah titik yang berada pada kedalaman h dari permukaan zat cair statis adalah

$$P = \rho g h \quad (2.7)$$

Dimana :

P = Tekanan Hidrostatik (N/m^2)

ρ = Massa Jenis (kg/m^3)

g = Percepatan Gravitasi (m/s^2)

h = Kedalaman (m)

Tekanan didefinisikan sebagai besarnya gaya (F) tiap satuan luas bidang yang dikenainya (A). apabila suatu zat (padat, cair, gas) menerima gaya yang bekerja secara tegak lurus terhadap luas permukaan zat tersebut, maka dapat dirumuskan :

$$P = \frac{F}{A} \quad (2.8)$$

Dimana :

P = Tekanan (N/m²)

F = Gaya (N)

A = Luas penampang (m²)

2.4 Metode Elemen Hingga

Metode Elemen Hingga adalah metode numerik yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan teknik dan problem matematis dari suatu gejala fisis. Adapun dasar dari metode elemen hingga yaitu, membagi benda kerja menjadi elemen-elemen kecil yang jumlahnya berhingga sehingga dapat menghitung reaksi akibat beban (*load*) pada kondisi batas (*boundary condition*) yang diberikan. Tipe masalah teknis dan matematis fisis yang dapat diselesaikan dengan metode elemen hingga terbagi dalam dua kelompok, yaitu kelompok analisa struktur dan kelompok masalah-masalah non-struktur.

Tipe-tipe permasalahan struktur meliputi (Susatio, 2004) :

1. Analisa getaran atau stress, meliputi analisa *Truss* dan *frame* serta masalah-masalah yang berhubungan dengan tegangan-tegangan yang terkonsentrasi.
2. Buckling
3. Analisa getaran

Problem non-struktur yang dapat dipecahkan dengan metode ini meliputi :

1. Perpindahan panas dan massa
2. Mekanika fluida, termasuk aliran fluida lewat media porus
3. Distribusi dari potensial listrik dan potensial magnet

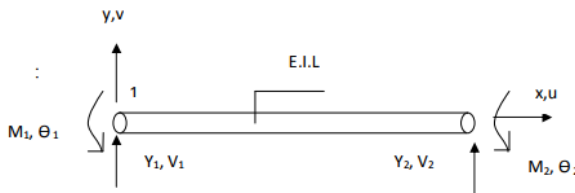
Pembebanan terhadap struktur yang kompleks, pada umumnya sulit dipecahkan melalui matematika analisis. Hal ini disebabkan karena matematika analisis memerlukan besaran atau harga yang harus diketahui pada setiap titik pada struktur yang dikaji.

Penyelesaian analisis dari suatu persamaan differensial suatu geometri yang kompleks, pembebanan yang rumit, tidak mudah diperoleh. Formulasi dari metode elemen hingga dapat digunakan untuk mengatasi permasalahan ini.

2.4.1. Elemen Beam Uniform

Elemen beam merupakan elemen paling banyak dijumpai pada bidang *engineering*, seperti pada jembatan, automotif, dan lain-lain.

Beam adalah struktur atau elemen struktur yang menerima beban (utama) berupa gaya geser dan momen lentur, sehingga perpindahannya adalah defleksi (tegak lurus sumbu pipa) dan perpindahan sudut. Elemen beam dengan penampang melintang uniform dapat dilihat pada Gambar 2.3 berikut ini:



Gambar 2. 3 *Beam dengan Penampang Uniform*

Beam seperti pada Gambar 2.3 dapat menerima beban lateral atau beban yang tegak lurus pada beam. Sifat-sifat elemen beam yaitu :

1. 2 node per elemen
2. 2 DOF (Degree Of Freedom) pada setiap node yaitu perpindahan translatif kearah sumbu y dinyatakan dalam v, dan perpindahan rotatif sekitar sumbu panjang elemen dinyatakan dalam θ
3. Data teknik yang diperlukan

Panjang beam : L
 Momen Inersia : I
 Modulus Elastis : E

4. Jenis Pembebanan

Gayat Lateral : Y
 Momen : M

Persamaan kesetimbangan beam tanpa beban disajikan dalam persamaan differensial:

$$\frac{\partial^4 v}{\partial x^4} = 0 \quad (2.9)$$

Dimana $v(x)$ adalah defleksi beam, yang merupakan solusi dari persamaan differential. $V(x)$ dinyatakan dalam bentuk polynomial derajat tiga sebagai berikut:

$$v(x) = a_1 + a_2 x + a_3 x^2 + a_4 x^3 \quad (2.10)$$

Dimana koefisien a_i akan ditentukan dari kondisi batas dari setiap node seperti dinyatakan dibawah ini :

$$\begin{aligned} \text{Pada } x = 0 \quad v = v_1 \quad \text{dan} \quad \frac{\partial v}{\partial x} &= \theta_1 \\ x = L \quad v = v_2 \quad \text{dan} \quad \frac{\partial v}{\partial x} &= \theta_2 \end{aligned}$$

persamaan (2.10) dideferensialkan terhadap x , sehingga diperoleh:

$$\frac{\partial v(x)}{\partial x} = a_2 + 2a_3 x + 3a_4 x^2 \quad (2.11)$$

Substitusikan harga batas yang ada ke persamaan (2.10) dan persamaan (2.11)

$$\begin{aligned} x = 0 \quad v = v_1 \quad \text{maka} \quad v_1 &= a_1 \\ x = 0 \quad \frac{\partial v}{\partial x} &= \theta_1 \quad \text{maka} \quad \theta_1 = a_2 \\ x = L \quad v = v_2 \quad \text{maka} \quad v_2 &= a_1 + La_2 + L^2 a_3 + L^3 a_4 \\ x = L \quad \frac{\partial v}{\partial x} &= \theta_2 \quad \text{maka} \quad \theta_2 = a_2 + 2a_3 L + 3a_4 L^2 \end{aligned}$$

dari keempat persamaan diatas diperoleh persamaan – persamaan v_1 , θ_1 , v_2 dan θ_2 dinyatakan masing-masing dalam a_1 , a_2 , a_3 dan a_4

$$\begin{Bmatrix} v_1 \\ \theta_1 \\ v_2 \\ \theta_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & L & L^2 & L^3 \\ 0 & 1 & 2L & 3L^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{Bmatrix} \quad (2.12)$$

Persamaan (2.12) jika dinyatakan dalam bentuk simbol yaitu :

$$\{q\} = [T]\{a\} \quad (2.13)$$

Maka $\{a\} = [T]^{-1}\{q\}$ dimana $[T]^{-1}$ adalah invers dari $[T]$ diperoleh :

$$\begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{Bmatrix} = \frac{1}{L^3} \begin{bmatrix} L^3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L^3 & 0 & 0 \\ -3L & -2L^2 & 3L & -L^2 \\ 2 & L & -2 & L \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_1 \\ \theta_1 \\ v_2 \\ \theta_2 \end{Bmatrix} \quad (2.14)$$

a_1 , a_2 , a_3 dan a_4 disubsitusikan ke persamaan (2.10) sehingga diperoleh :

$$v(x) = v_1 + x\theta_1 - \frac{3x^2}{L^2}v_1 - \frac{2x^2}{L}\theta_1 + \frac{3x^2}{L^2}v_2 - \frac{x^2}{L}\theta_2 + \frac{2x^3}{L^3}v_1 + \frac{x^3}{L^2}\theta_1 - \frac{2x^3}{L^3}v_2 + \frac{x^3}{L^2}\theta_2 \quad (2.15)$$

Persamaan (2.15) dapat diubah menjadi:

$$v(x) = f_1(x)v_1 + f_2(x)\theta_1 + f_3(x)v_2 + f_4(x)\theta_2 \quad (2.16)$$

Dimana :

$$f_1(x) = 1 - 3\left(\frac{x}{L}\right)^2 + 2\left(\frac{x}{L}\right)^3 \quad f_3(x) = 3\left(\frac{x}{L}\right)^2 + 2\left(\frac{x}{L}\right)^3$$

$$f_2(x) = x - 2\left(\frac{x^2}{L}\right) + \frac{x^3}{L^2} \quad f_4(x) = -\left(\frac{x^2}{L}\right) + \frac{x^3}{L^2} \quad (2.17)$$

Dimana $f(x)$ adalah shape function untuk interval 0-L.

Persamaan kekakuan

Persamaan kekakuan untuk elemen beam diturunkan dari teorema Castigliano

$$F_i = \frac{\partial v}{\partial q_i}$$

Dimana :

F_i = gaya (Y) atau Momen (M) nodal

q_i = Displacement nodal

jika F = gaya maka q = displacement translasi (v)

jika F = momen maka q = displacement rotasi (θ)

U = energi strain

I = nomor DOF (degree of freedom)

Energy strain dan elemen beam dengan penampang uniform adalah

$$U = \frac{EI}{2} \int_0^L \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right)^2 dx \quad (2.18)$$

Dideferensialkan dua kali dari persamaan (2.18) sehingga dihasilkan:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = f_1''(x)v_1 + f_2''(x)\theta_1 + f_3''(x)v_2 + f_4''(x)\theta_2 \quad (2.19)$$

Dimana f'' diperoleh dari differensial dua kali terhadap x dari persamaan (2.17)

$$f_1''(x) = -\frac{6}{L^2} + 12\frac{x}{L^3}$$

$$f_2''(x) = -\frac{4}{L} + 6\frac{x}{L^2}$$

$$f_3''(x) = \frac{6}{L^2} - 12\frac{x}{L^3}$$

$$f_4''(x) = -\frac{2}{L} + 6\frac{x}{L^2} \quad (2.20)$$

Menghitung gaya :

$$F = \frac{\partial U}{\partial q_i}$$

Gaya pada node 1

$$Y_1 = \frac{\partial U}{\partial V_1} = \frac{\partial}{\partial V_1} \left[\frac{EI}{2} \int_0^L \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right)^2 dx \right]$$

$$Y_1 = \frac{EI}{2} \int_0^L 2 \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right) \frac{\partial}{\partial V_1} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right) dx$$

Sehingga :

$$Y_1 = \left(EI \int_0^L f_1''(x) f_1''(x) dx \right) v_1 + \left(EI \int_0^L f_1''(x) f_2''(x) dx \right) \theta_1 + \left(EI \int_0^L f_1''(x) f_3''(x) dx \right) v_2 + \left(EI \int_0^L f_1''(x) f_4''(x) dx \right) \theta_2 \quad (2.21)$$

$$Y_1 = k_{11}v_1 + k_{12}\theta_1 + k_{13}v_2 + k_{14}\theta_2$$

Dimana :

$$k_{11} = EI \int_0^L f_1''(x) f_1''(x) dx \quad k_{12} = EI \int_0^L f_1''(x) f_2''(x) dx$$

$$k_{13} = EI \int_0^L f_1''(x) f_3''(x) dx \quad k_{14} = EI \int_0^L f_1''(x) f_4''(x) dx$$

$$\text{Maka : } k_{ij} = EI \int_0^L f_i''(x) f_j''(x) dx \quad (2.22)$$

Persamaan (2.22) menyatakan matriks kekakuan elemen beam dengan ordo 4x4

Momen dengan node 1 :

$$M_1 = k_{21}v_1 + k_{22}\theta_1 + k_{23}v_2 + k_{24}\theta_2$$

Dengan cara yang sama untuk node 2 dapat dihitung Y_2 dan M_2 masing-masing pada node 2 dan selanjutnya dapat dihitung k_{ij} yang lainnya. Persamaan kesetimbangan untuk elemen beam dapat ditentukan sebagai berikut:

$$\begin{Bmatrix} Y_1 \\ M_1 \\ Y_2 \\ M_2 \end{Bmatrix} = \frac{EI}{L} \begin{bmatrix} \frac{12}{L^2} & \frac{6}{L} & -\frac{12}{L^2} & \frac{6}{L} \\ \frac{6}{L} & 4 & -\frac{6}{L} & 2 \\ -\frac{12}{L^2} & -\frac{6}{L} & \frac{12}{L^2} & -\frac{6}{L} \\ \frac{6}{L} & 2 & -\frac{6}{L} & 4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_1 \\ \theta_1 \\ v_2 \\ \theta_2 \end{Bmatrix} \quad (2.23)$$

Secara simbol $\{F\} = [k]\{q\}$

Dimana $\{F\}$ adalah matriks vector gaya global pada masing-masing node, $[k]$ adalah matriks kekakuan global dan $\{q\}$ disebut matriks vector perpindahan global.

2.4.2. Beam Dengan Beban Terdistribusi

Kerja atau usaha yang dilakukan oleh beban (berupa gaya atau momen) pada beam, dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$W = \frac{1}{2} [Y_1 \ M_1 \ Y_2 \ M_2] \begin{Bmatrix} v_1 \\ \theta_1 \\ v_2 \\ \theta_2 \end{Bmatrix} \quad (2.24)$$

Dimana $[Y_1 \ M_1 \ Y_2 \ M_2]$ = matrik beban dan matrik kolom $\{v_1 \ \theta_1 \ v_2 \ \theta_2\}^T$ adalah matrik Displacement.

Dalam bentuk lain, persamaan (2.24) dapat ditulis sebagai :

$$W = \frac{1}{2} \int_0^L P(x) v(x) dx \quad (2.25)$$

Dimana : $P(x)$ = gaya atau momen yang dikenakan pada beam

$V(x)$ = fungsi defleksi

Persamaan (2.24) dan (2.25) digabungkan sehingga didapatkan :

$$\frac{1}{2} [Y_1 \ M_1 \ Y_2 \ M_2] \begin{Bmatrix} v_1 \\ \theta_1 \\ v_2 \\ \theta_2 \end{Bmatrix} = \frac{1}{2} \int_0^L P(x) [f_1 \ f_2 \ f_3 \ f_4] \begin{Bmatrix} v_1 \\ \theta_1 \\ v_2 \\ \theta_2 \end{Bmatrix} dx$$

$$[Y_1 \ M_1 \ Y_2 \ M_2] = \int_0^L P(x) [f_1 \ f_2 \ f_3 \ f_4] dx \quad (2.26)$$

Dalam bentuk symbol ditulis :

$$F_i = \int_0^L P(x) f_i(x) dx \quad (2. 27)$$

2.5 Frekuensi Natural dan Eigen Value

Frekuensi Natural adalah frekuensi yang terjadi apabila system tidak dikenai gaya luar atau $F(t) = 0$, $L(t) = 0$. Selain itu sistem juga tidak teredam atau $C = 0$. Untuk getaran bebas sistem tanpa redaman dengan derajat kebebasan banyak, persamaan gerak yang dinyatakan dalam bentuk matriks menjadi (T.Thomson, 1986) :

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = 0 \quad (2. 28)$$

Dimana :

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ m_{n1} & m_{n2} \dots & m_{nn} \end{bmatrix} = \text{matriks massa}$$

$$K = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ k_{n1} & k_{n2} \dots & k_{nn} \end{bmatrix} = \text{matriks kekakuan}$$

$$X = \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ \cdot \\ x_n \end{Bmatrix} = \text{matriks kolom (vector simpangan)}$$

Jika tidak ada kedwitarian (ambiguity), maka kurung dan kurung siku akan dihilangkan dan akan digunakan huruf besar dan persamaan matriks ditulis secara sederhana sebagai

$$M\ddot{X} + KX = 0 \quad (2. 29)$$

Jika persamaan (2.29) dikalikan dengan M^{-1} maka akan didapat:

$$M^{-1}M = I \text{ (matriks satuan)}$$

$$M^{-1}K = A \text{ (matriks sistem)}$$

dan

$$I\ddot{X} + AX = 0 \quad (2.30)$$

Matriks A disebut matriks sistem atau matriks dinamik karena sifat dinamik sistem didefinisikan oleh matriks ini.

Dengan menganggap gerak harmonik $\ddot{X} = -\lambda X$, dimana $\lambda = \omega^2$ persamaan (2.30) menjadi :

$$[A - \lambda I]\{X\} = 0 \quad (2.31)$$

Persamaan karakteristik sistem adalah determinan yang disamakan nol, atau

$$[A - \lambda I] = 0 \quad (2.32)$$

Akar-akar persamaan karakteristik disebut *eigenvalue* dan frekuensi natural sistem ditentukan dari sini oleh hubungan

$$\lambda_i = \omega_i^2$$

Tiap nilai eigen dan vector eigen menjelaskan modus dari getaran bebas struktur. Nilai eigen ke-i λ_i dihubungkan dengan frekuensi natural ke-I seperti berikut

$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi} \quad (2.33)$$

2.6 Matriks Massa

Rumus umum untuk mencari massa konsisten menurut William Weaver Jr adalah :

$$\mathbf{M} = \mathbf{h}^{-T} \int_V \rho \mathbf{g}^T \mathbf{g} dV \mathbf{h}^{-1} \quad (2.34)$$

Untuk elemen balok atau elemen lentur dimana penampang melintang untuk tipe elemen ini mengalami translasi dalam arah y dan juga berotasi terhadap sumbu netralnya. Dengan matriks geometri:

$$\mathbf{g} = [1 \quad x \quad x^2 \quad x^3]$$

Kemudian hasil kali $\mathbf{g}^T \mathbf{g}$ menjadi:

$$\mathbf{g}^T \mathbf{g} = \begin{bmatrix} 1 & x & x^2 & x^3 \\ x & x^2 & x^3 & x^4 \\ x^2 & x^3 & x^4 & x^5 \\ x^3 & x^4 & x^5 & x^6 \end{bmatrix}$$

Dan integral perkalian ini sepanjang elemen L adalah:

$$\int_0^L \mathbf{g}^T \mathbf{g} \, dx = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2}L^2 & \frac{1}{3}L^3 & \frac{1}{4}L^4 \\ \frac{1}{2}L^2 & \frac{1}{3}L^3 & \frac{1}{4}L^4 & \frac{1}{5}L^5 \\ \frac{1}{3}L^3 & \frac{1}{4}L^4 & \frac{1}{5}L^5 & \frac{1}{6}L^6 \\ \frac{1}{4}L^4 & \frac{1}{5}L^5 & \frac{1}{6}L^6 & \frac{1}{7}L^7 \end{bmatrix}$$

Dan

$$\mathbf{h}^{-1} = \frac{1}{L^3} \begin{bmatrix} L^3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L^3 & 0 & 0 \\ -3L & -2L^2 & 3L & -L^2 \\ 2 & L & -2 & L \end{bmatrix}$$

Maka diperoleh matriks massa konsisten inersia translasi sebagai berikut:

$$\mathbf{M}_t = \frac{\rho A L}{420} \begin{bmatrix} 156 & 22L & 54 & -13L \\ 22L & 4L^2 & 13L & -3L^2 \\ 54 & 13L & 156 & -22L \\ -13L & -3L^2 & -22L & 4L^2 \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

Dimana

ρ = Massa jenis (kg/m^3)
 A = Luas penampang (m^2)
 L = Panjang (m)

2.7 Stress dan Strain

Setiap material tentunya memiliki suatu bentuk hubungan antara tegangan dan regangan yang dimiliki material tersebut. Hubungan antara tegangan dan regangan ini menggambarkan kekakuan suatu material. Parameter yang menghubungkan antara tegangan dan regangan ini disebut modulus elastisitas. Modulus elastisitas yang memiliki istilah lain yaitu Modulus Young adalah perbandingan antara tegangan dan regangan aksial (satu dimensi) dalam deformasi yang elastis. Modulus elastisitas menggambarkan kekakuan suatu material yang berarti bahwa apabila suatu material memiliki nilai modulus elastisitas yang besar, maka semakin kecil perubahan bentuk yang terjadi apabila diberi tegangan tertentu.

Tegangan adalah besaran yang menyatakan perbandingan antara suatu besaran gaya terhadap luas penampang yang tegak lurus terhadap gaya tersebut, berikut adalah persamaan matematis untuk tegangan :

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.36)$$

dimana :

σ = Tegangan (N/m^2)

F = Gaya (N)

A = Luas Penampang (m^2)

Regangan adalah besaran yang menyatakan suatu perbandingan antara perubahan panjang terhadap panjang awal dari suatu material. Gambar spesimen Tarik dapat dilihat pada Gambar 2.4. Berikut adalah persamaan matematis untuk regangan:

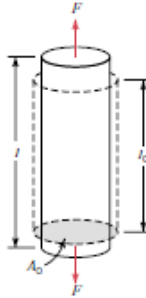
$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.37)$$

dimana :

ε = Regangan

ΔL = Perubahan Panjang (m)

L_0 = Panjang Awal (m)



Gambar 2. 4 Skematik Beban Tarik Menghasilkan Elongasi dan Regangan Linier (William D.Callister, 2014)

Pada Gambar 2.4 garis putus-putus mewakili bentuk sebelum deformasi dan garis padat mewakili sudah terdeformasi.

Hukum Hooke menunjukkan bahwa terjadi hubungan yang linier antara tegangan dan regangan suatu material. Dimana hubungan keduanya ditentukan berdasarkan nilai modulus elastisitas / modulus young (E) dari masing-masing material. Hubungan antara regangan dan tegangan secara matematis dapat dituliskan dengan rumus :

$$\sigma = E \varepsilon \quad (2. 38)$$

dimana :

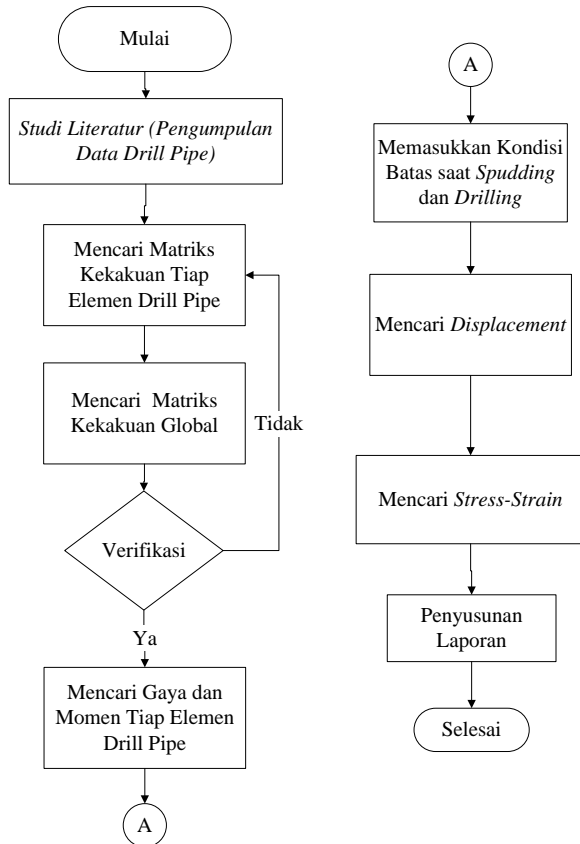
E = Modulus Elastisitas (N/m^2)

σ = Tegangan (N/m^2)

ε = Regangan

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

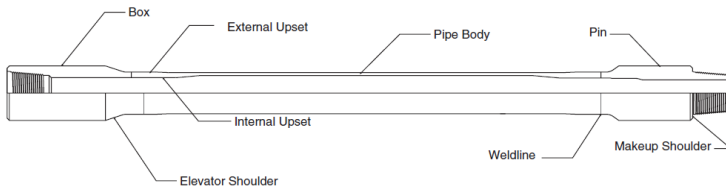
Pada bab ini akan dijelaskan tahapan-tahapan penelitian tugas akhir yang dapat dilihat pada Gambar 3. 1 dibawah ini.



Gambar 3. 1 Diagram Alir Tugas Akhir

3.1. Pengumpulan Data *Drill Pipe*

Tahap pertama pada penelitian tugas akhir ini yaitu studi literatur dengan mencari penelitian yang pernah dilakukan sebelumnya yang berkaitan dengan tugas akhir ini. Kemudian mencari data *drill pipe* berupa dimensi yang meliputi panjang pipa, diameter luar pipa, diameter dalam pipa, modulus elastisitas pipa dan torsi yang diberikan. Data *drill pipe* yang penulis gunakan berasal dari API (*American Petroleum Institute*) dan *spec sheet drill pipe workstring international* (International, 2017).



Gambar 3. 2 Desain *Drill String* (Plisga, 2005)

Gambar 3.2 menunjukkan desain *drill string*. Tabel 3.1 menunjukkan spesifikasi data *drill pipe* yang memiliki panjang yang sama namun diameter luar dan diameter dalam yang berbeda

Tabel 3. 1 Spesifikasi Data *Drill Pipe* Variasi Diameter (Plisga, 2005)

Grade	Panjang (ft)	Diameter Luar (in)	Diameter Dalam (in)
S-135	44,5	5	4,276
V-150	44,5	5,875	5,045
Z-140	44,6	4,5	3,826

Tabel 3. 2 Spesifikasi Data *Drill Pipe* Variasi Panjang (Plisga, 2005)

Grade	Panjang (ft)	Diameter Luar (in)	Diameter Dalam (in)
S-135	44,5	5	4,276
G-105	31,5	5	4,276
Z-140	32,2	5	4,276

Tabel 3.2 menunjukkan spesifikasi data *drill pipe* yang memiliki diameter luar dan diameter dalam yang sama namun panjangnya berbeda.

3.2. Perhitungan Matriks Kekakuan Lokal

Kemudian tahapan selanjutnya yaitu mencari nilai matriks kekakuan lokal tiap elemen sebanyak 20 elemen untuk *drill pipe* dengan grade S-135, 29 elemen untuk *drill pipe* dengan grade G-105 dan 28 elemen untuk *drill pipe* dengan grade Z-140. Banyaknya elemen ditentukan dari panjangnya *drill pipe* untuk bias mencapai kedalaman 270 meter. *Software Mathcad* digunakan untuk mempermudah perhitungan karena besarnya matriks yang akan dianalisis. Pada grade S-135 *node* yang akan dianalisis berjumlah 21 buah, maka akan menghasilkan Matriks berorde 42 x 42. Gambar 3.3 dibawah ini merupakan pendefinisian matriks kekakuan lokal

$$i := 1..42 \quad j := 1..42 \quad k1_{i,j} := 0$$

$$K1 := \frac{E \cdot I}{L} \begin{pmatrix} \frac{12}{L^2} & \frac{6}{L} & -\frac{12}{L^2} & \frac{6}{L} \\ \frac{6}{L} & 4 & -\frac{6}{L} & 2 \\ -\frac{12}{L^2} & -\frac{6}{L} & \frac{12}{L^2} & -\frac{6}{L} \\ \frac{6}{L} & 2 & -\frac{6}{L} & 4 \end{pmatrix}$$

$$\begin{array}{llll} k1_{1,1} := K1_{1,1} & k1_{1,2} := K1_{1,2} & k1_{1,3} := K1_{1,3} & k1_{1,4} := K1_{1,4} \\ k1_{2,1} := K1_{2,1} & k1_{2,2} := K1_{2,2} & k1_{2,3} := K1_{2,3} & k1_{2,4} := K1_{2,4} \\ k1_{3,1} := K1_{3,1} & k1_{3,2} := K1_{3,2} & k1_{3,3} := K1_{3,3} & k1_{3,4} := K1_{3,4} \\ k1_{4,1} := K1_{4,1} & k1_{4,2} := K1_{4,2} & k1_{4,3} := K1_{4,3} & k1_{4,4} := K1_{4,4} \end{array}$$

Gambar 3. 3 Pendefinisian Tiap Elemen Matriks pada *Software Mathcad*

Gambar 3.3 untuk mencari matriks kekakuan lokal pada elemen 1, dimana i merupakan pendefinisian variable untuk baris dengan rentang baris 1-42 dan j merupakan pendefinisian variable untuk kolom dengan rentang 1-42. $k_{1ij} := 0$ artinya setiap komponen pada matriks mempunyai nilai 0 kecuali untuk komponen yang didefinisikan mempunyai nilai lain.

Untuk mendapatkan matriks kekakuan lokal pada elemen lainnya sama seperti pada Gambar 3. 3, yang berbeda hanya pendefinisian saja.

3.3. Perhitungan Matriks Kekakuan Global

Setelah dihitung matriks kekakuan lokal pada tiap elemen maka langkah selanjutnya adalah mendapatkan matriks kekakuan global dengan cara menjumlahkan matriks kekakuan lokal tiap elemen dengan menggunakan metode *assemblage*. Pada metode penggabungan secara *assemblage*, akan terdapat lebih banyak komponen yang mempunyai nilai 0 dibandingkan komponen yang mempunyai nilai. Gambar 3. 4 berikut merupakan perhitungan matriks kekakuan global untuk grade S-135.

$$K_{\text{global}} = k_1 + k_2 + k_3 + k_4 + k_5 + k_6 + k_7 + k_8 + k_9 + k_{10} + k_{11} + k_{12} + k_{13} + k_{14} + k_{15} + k_{16} + k_{17} + k_{18} + k_{19} + k_{20}$$

$K =$

	1	2	3	4	5
1	$1.248 \cdot 10^9$	$8.461 \cdot 10^9$	$-1.248 \cdot 10^9$	$8.461 \cdot 10^9$	0
2	$8.461 \cdot 10^9$	$7.651 \cdot 10^{10}$	$-8.461 \cdot 10^9$	$3.825 \cdot 10^{10}$	0
3	$-1.248 \cdot 10^9$	$-8.461 \cdot 10^9$	$2.495 \cdot 10^9$	0	$-1.248 \cdot 10^9$
4	$8.461 \cdot 10^9$	$3.825 \cdot 10^{10}$	0	$1.53 \cdot 10^{11}$	$-8.461 \cdot 10^9$
5	0	0	$-1.248 \cdot 10^9$	$-8.461 \cdot 10^9$	$2.495 \cdot 10^9$
6	0	0	$8.461 \cdot 10^9$	$3.825 \cdot 10^{10}$	0
7	0	0	0	0	$-1.248 \cdot 10^9$
8	0	0	0	0	$8.461 \cdot 10^9$
9	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	...

Gambar 3. 4 Matriks Kekakuan Global

Setelah mendapatkan matriks kekakuan global selanjutnya memverifikasi data tersebut apakah hasilnya benar atau tidak. Jika tidak maka harus dicek kembali pada matriks kekakuan lokalnya.

3.4. Perhitungan Gaya dan Momen

Setelah mendapatkan matriks kekakuan global, langkah selanjutnya adalah perhitungan gaya dan momen tiap elemen. Gaya dan momen didapatkan dengan menggunakan persamaan 2.27 yang nilai $P(x)$ nya berasal dari persamaan 2.7 yang telah dijelaskan pada bab 2.

Pada model *drill pipe* di tugas akhir ini terdapat dua gaya, yaitu gaya yang berasal dari mesin = 0 dan gaya yang berasal dari tekanan air laut. Begitu juga dengan momen terdiri dari 2 momen punter, yaitu momen yang berasal dari mesin (Torsi) dan momen yang berasal dari tekanan air laut. Gambar 3. 5 dibawah ini merupakan perhitungan gaya dan momen pada elemen 1.

$$\begin{aligned}
 Y1 &:= \int_0^L P(x) \cdot \left(\frac{2 \cdot x^3}{L^3} - \frac{3 \cdot x^2}{L^2} + 1 \right) dx & Y1 &= 9.7 \times 10^5 \\
 M1 &:= \int_0^L P(x) \cdot \left(x - \frac{2 \cdot x^2}{L} + \frac{x^3}{L^2} \right) dx & M1 &= 2.406 \times 10^6 \\
 Y2a &:= \int_0^L P(x) \cdot \left(\frac{3 \cdot x^2}{L^2} - \frac{2 \cdot x^3}{L^3} \right) dx & Y2a &= 1.347 \times 10^6 \\
 M2a &:= \int_0^L P(x) \cdot \left(\frac{x^3}{L^2} - \frac{x^2}{L} \right) dx & M2a &= -2.832 \times 10^6
 \end{aligned}$$

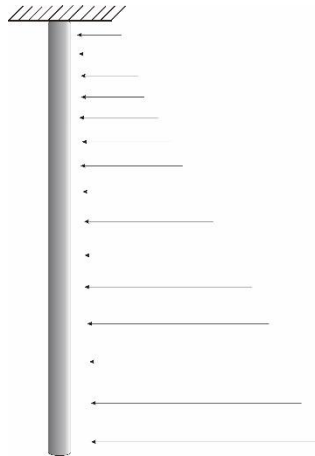
Gambar 3. 5 Perhitungan Gaya dan Momen pada Mathcad

3.5. Menentukan Syarat Batas

Syarat batas dibuat untuk dapat menyelesaikan masalah persamaan kesetimbangan saat kondisi *spudding in* dan *drilling*.

Kondisi *spudding in* yaitu kondisi saat *drill bit* baru akan mengebor dasar laut dan kondisi *drilling* yaitu kondisi saat *drill bit* sudah masuk kedalam formasi.

Kondisi *spudding in* merupakan keadaan dimana awal mulai pengeboran sumur baru, sehingga *drill pipe* dan *drill bit* belum dikenai torsi. Pada kondisi ini *drill bit* belum menyentuh tanah, sehingga syarat batas yang digunakan yaitu $v_1 = 0$ dan $\theta_1 = 0$ pada node 1 (teratas) yang disebut dengan tumpuan mati dan node terbawah dibiarkan bebas. Untuk kondisi *spudding in* dapat dilihat pada Gambar 3. 6

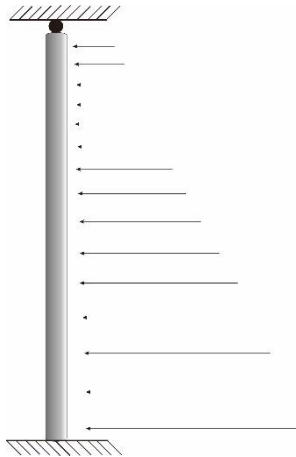


Gambar 3. 6 *Drill Pipe* Kondisi *Spudding In*

Gaya eksternal yang diperhitungkan pada penelitian ini yaitu tekanan hidrostatik. Tekanan hidrostatik jika semakin dalam maka semakin besar tekanannya. Sehingga beban yang mengenai node terakhir pada *drill pipe* (ujung bawah pipa) lebih besar dari node lainnya.

Drilling adalah keadaan dimana *drill bit* sudah menggerus tanah dan memasuki formasi. Sehingga untuk kondisi *drilling* syarat batas yang digunakan yaitu $v_1 = 0$ pada node 1 (teratas) yang disebut dengan tumpuan roll dan $v_{21} = 0$ dan $\theta_{21} = 0$ pada node

terbawah yang disebut dengan tumpuan mati. Untuk kondisi *drilling* dapat dilihat pada Gambar 3. 7



Gambar 3. 7 *Drill Pipe* Kondisi *Drilling*

3.6. Perhitungan Displacement

Untuk mendapatkan respon displacement pada tiap node, node yang mati perlu dihilangkan. Gambar dibawah ini contoh dari penghilangan node yang mati

$$\begin{array}{c}
 \cancel{F1} \\
 F2 \\
 F3 \\
 \cancel{F4}
 \end{array}
 =
 \begin{array}{cccc}
 \cancel{0} & \cancel{0} & \cancel{0} & \cancel{0} \\
 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 3000 & -2000 \\
 \cancel{0} & \cancel{0} & \cancel{2000} & \cancel{5000}
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \cancel{d1} \\
 d2 \\
 d3 \\
 \cancel{d4}
 \end{array}$$

Gambar 3. 8 Penghilangan Node Mati

Pada Gambar 3. 8 merupakan contoh cara menghilangkan node yang mati, sehingga matriks gaya yang digunakan yaitu F2 dan F3. Untuk mendapatkan gaya yang sudah dihilangkan dapat menggunakan submatrix pada Mathcad, seperti

$$\mathbf{Fakt} = \mathbf{submatrix}(\mathbf{F}, 2, 3, 1, 1) \quad (3. 1)$$

Dari persamaan diatas, Fakt merupakan gaya yang sudah dihilangkan node yang mati dan submatrix(F,2,3,1,1) artinya diambil dari matrix F pada baris 2 sampai 3 dan kolom 1 sampai 1. Dan untuk mendapatkan matriks kekakuan aktual dapat dihitung dengan menggunakan *software mathcad* dengan cara :

$$\mathbf{Kakt} = \text{submatrix}(\mathbf{K}, 2, 3, 2, 3) \quad (3.2)$$

Setelah menghilangkan node yang mati, selanjutnya mencari *displacement*. Untuk mencari *displacement* digunakan persamaan umum kesetimbangan yaitu :

$$\{\mathbf{F}\} = (\mathbf{K})\{\mathbf{d}\} \quad (3.3)$$

$$\{\mathbf{d}\} = (\mathbf{K})^{-1}\{\mathbf{F}\} \quad (3.4)$$

Dimana F nya adalah Fakt dan Knya adalah Kakt, tanda { } artinya besaran vector dan tanda () artinya besaran skalar.

Setelah mendapatkan *displacement* dari tiap-tiap node, selanjutnya memverifikasi hasil dari *displacement* tersebut. Pada rangkaian *drill pipe*, *displacement* yang didapat haruslah semakin ke bawah semakin membesar karena tekanan pada air laut semakin dalam semakin membesar.

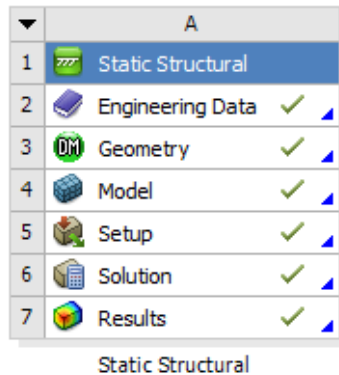
3.7. Perhitungan Stress-Strain

Setelah didapatkan *displacement* dari tiap-tiap node, langkah selanjutnya yaitu mencari *stress-strain* saat kondisi *spudding in* dan *drilling* pada tiap elemen. Untuk mencari *stress-strain* menggunakan persamaan (2.37) untuk *strain* dan (2.38) untuk *stress*.

3.8. Pemodelan Drill Pipe Menggunakan ANSYS

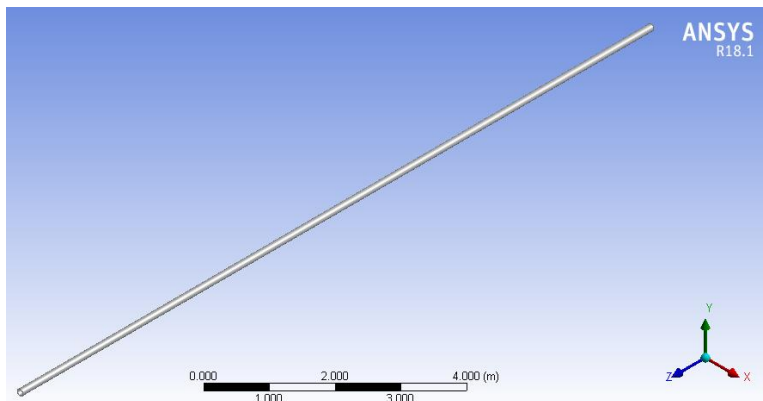
3.8.1. Desain Drill Pipe

Pendesainan *drill pipe* menggunakan *software* ANSYS Workbench 18.1. Modul yang digunakan untuk mendesain yaitu *design modeler* pada static structural yang dapat dilihat pada Gambar 3.9 berikut



Gambar 3. 9 Outline Simulasi ANSYS

Simulasi ANSYS digunakan untuk memverifikasi hasil perhitungan metode elemen hingga dengan menggunakan Mathcad. Dimana untuk memverifikasinya dengan mengambil satu elemen *drill pipe* saat keadaan spudding in. Desain *drill pipe* satu elemen dengan 2 node dapat dilihat pada Gambar 3.10 dibawah ini














Gambar 3. 10 Desain *Drill Pipe* Satu Elemen

3.8.2. *Engineering Data*

Engineering data digunakan untuk memilih material apa yang akan digunakan dalam simulasi. Pada penelitian ini

menggunakan bahan *structural steel* untuk semua jenis grade pada *drill pipe*. Gambar 3.11 berikut *engineering data* dari *drill pipe*.

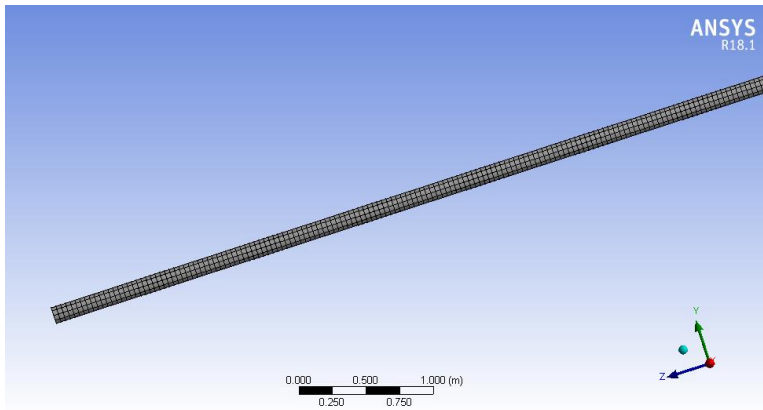
Properties of Outline Row 3: Structural Steel			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	 Density	7850	kg m ⁻³ ▾
3	 Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
4	 Coefficient of Thermal Expansion	1.2E-05	C ⁻¹ ▾
5	 Zero-Thermal-Strain Reference Temperature	22	C ▾
6	 Isotropic Elasticity		
7	Derive from	Young's Modu... ▾	
8	Young's Modulus	2.1E+11	Pa ▾
9	Poisson's Ratio	0.3	
10	Bulk Modulus	1.75E+11	Pa
11	Shear Modulus	8.0769E+10	Pa
12	 Alternating Stress Mean Stress	 Tabular	
13	Interpolation	Log-Log ▾	
14	Scale	1	
15	Offset	0	Pa
16	 Strain-Life Parameters		
17	Display Curve Type	Strain-Life ▾	
18	Strength Coefficient	9.2E+08	Pa ▾
19	Strength Exponent	-0.106	
20	Ductility Coefficient	0.213	
21	Ductility Exponent	-0.47	
22	Cyclic Strength Coefficient	1E+09	Pa ▾
23	Cyclic Strain Hardening Exponent	0.2	
24	 Tensile Yield Strength	2.5E+08	Pa ▾
25	 Compressive Yield Strength	2.5E+08	Pa ▾
26	 Tensile Ultimate Strength	4.6E+08	Pa ▾

Gambar 3. 11 *Propertise* dari Material *Structural Steel*

3.8.3. Pemodelan Struktur *Drill Pipe*

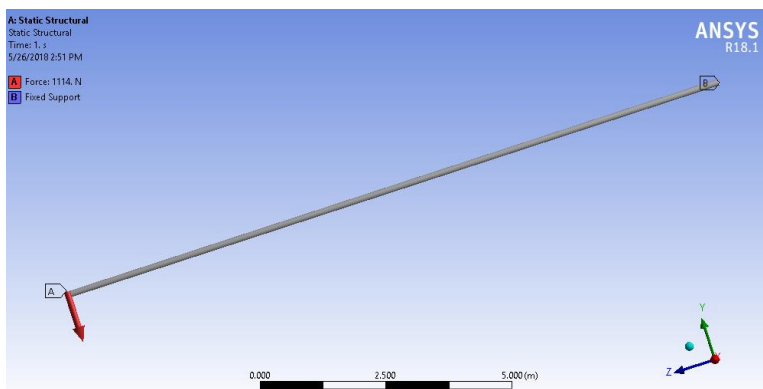
Pemodelan dilakukan di Modul ANSYS Mechanical pada *Static Structural* untuk mencari *deformation probe*, *momen reaction* dan *force reaction*.

Finite element pada ANSYS dilakukan dengan cara *meshing*. Pada *meshing* dapat ditentukan berapa ukuran yang akan diberikan tiap elemennya, pada penelitian ini ukuran elemen yang digunakan yaitu 0,084 m. Sebelum melakukan *meshing*, material yang akan digunakan dideklarasikan terlebih dahulu pada *geometri*. Setelah dilakukan *meshing* tampilan *drill pipe* adalah sebagai berikut :



Gambar 3. 12 Tampilan *Drill Pipe* Setelah *Meshing*

Untuk kondisi *spudding in*, kondisi dimana *drill pipe* belum berputar atau belum dikenai torsi dan belum menyentuh dasar laut, pemodelannya dapat dilihat pada Gambar 3.13 dimana pada node 1 diberi tumpuan *fixed support*, dan diberi beban gaya sebesar 1114 N pada node 2.



Gambar 3. 13 Pemodelan *Drill Pipe* 1 elemen saat *Spudding In*

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

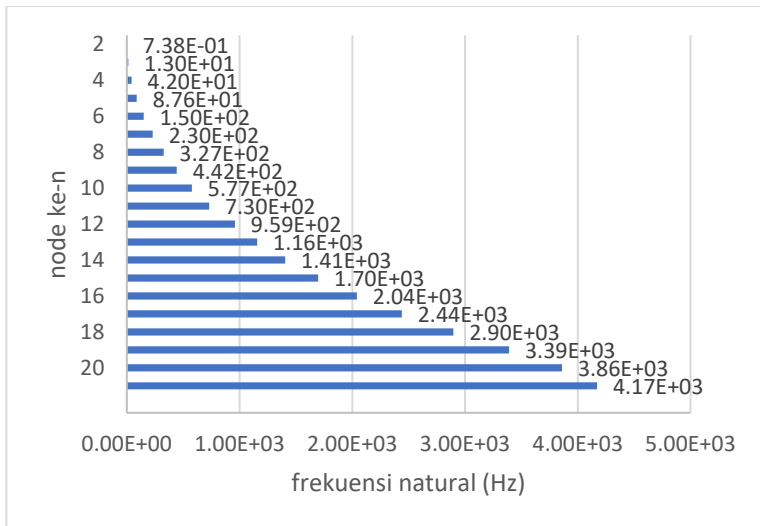
Bab ini akan membahas hasil perhitungan frekuensi natural dan *stress-strain* pada *drill pipe* saat kondisi *spudding in* dan *drilling* dengan menggunakan metode elemen hingga.

4.1 Variasi Diameter *Drill Pipe*

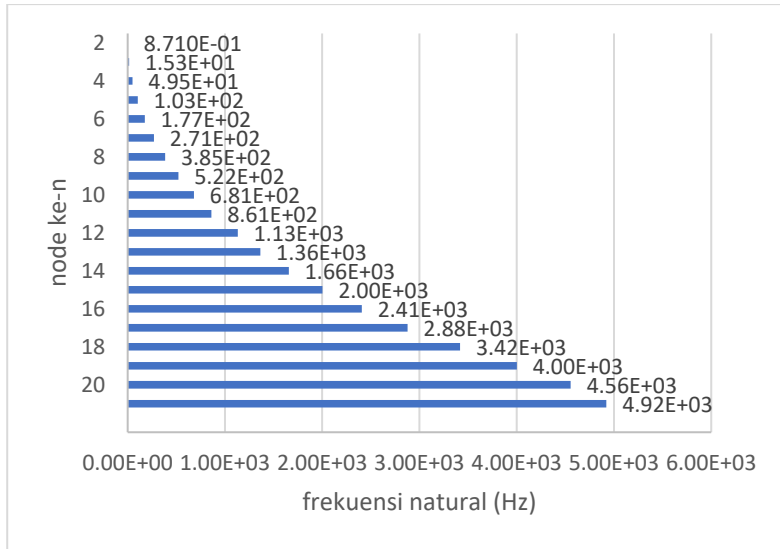
Terdapat tiga grade *drill pipe* dengan variasi diameter, yaitu grade S-135, grade V-150 dan grade Z-140. Masing-masing spesifikasi *drill pipe* dapat dilihat pada Tabel 3.1. torsi yang diberikan untuk semua grade yaitu sebesar 30.300 ft-lbs.

4.1.1. Frekuensi Natural

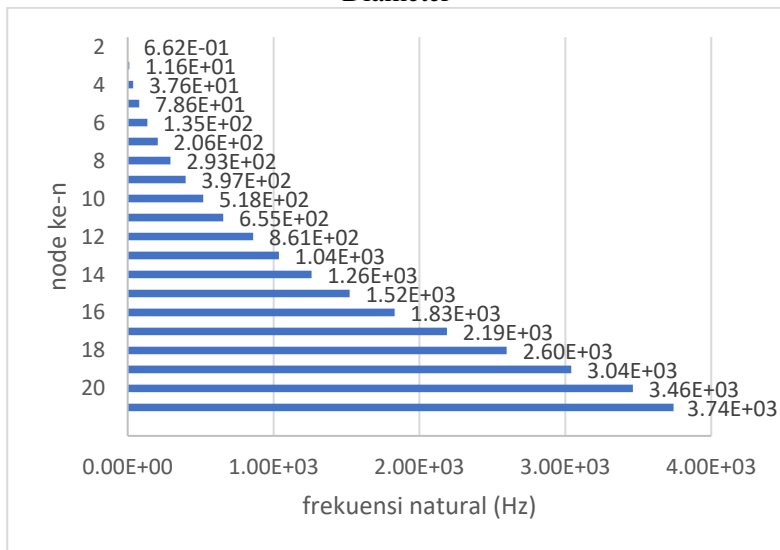
Frekuensi natural merupakan frekuensi yang terjadi apabila sistem tidak dikenai gaya luar. Frekuensi natural diperlukan untuk mengetahui kondisi frekuensi struktur tersebut. Perhitungan frekuensi natural diambil pada kondisi *spudding in*.



Gambar 4. 1 Frekuensi Natural *Drill Pipe* Grade S-135 Variasi Diameter

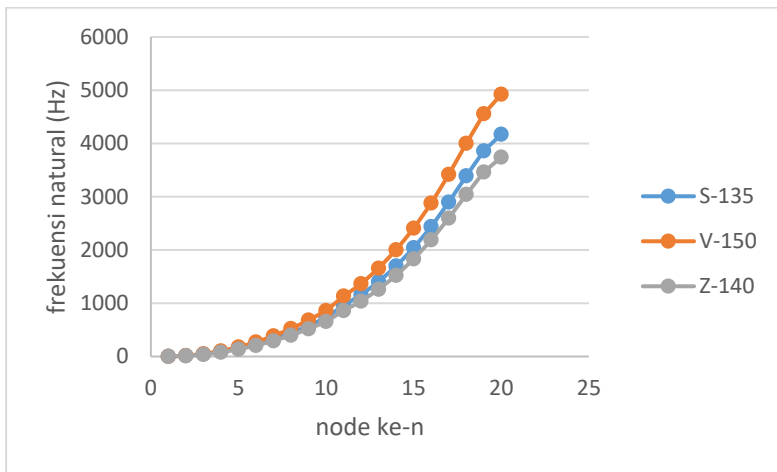


Gambar 4. 2 Frekuensi Natural *Drill Pipe* Grade V-150 Variasi Diameter



Gambar 4. 3 Frekuensi Natural *Drill Pipe* Grade Z-140 Variasi Diameter

Gambar 4.1, Gambar 4.2 dan Gambar 4.3 merupakan frekuensi natural *drill pipe* dari grade S-135, V-150 dan Z-140. Nilai frekuensi natural maksimal untuk *drill pipe* grade S-135 yaitu 4.171 Hz pada node 20, untuk *drill pipe* grade V-150 yaitu 4.922 Hz pada node 20 dan untuk *drill pipe* grade Z-140 yaitu 3.742 Hz pada node 20.



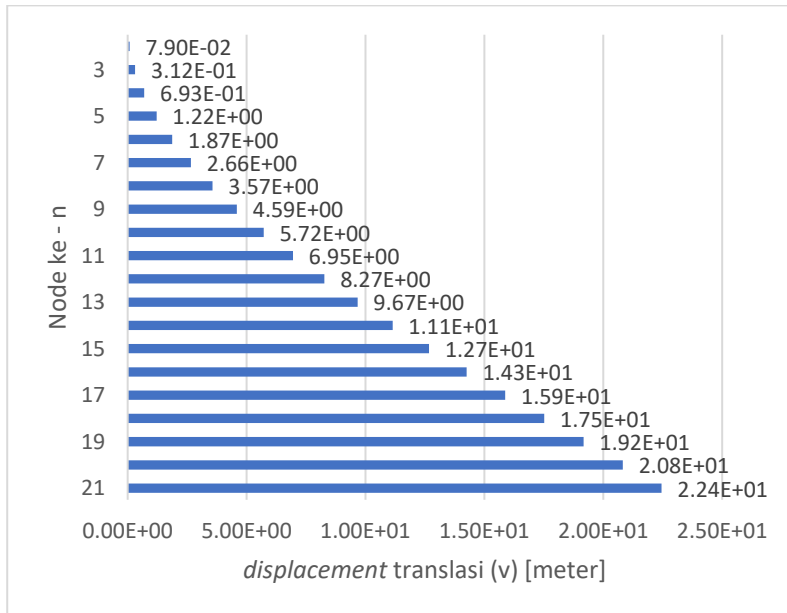
Gambar 4. 4 Perbandingan Frekuensi Natural *Drill Pipe* Variasi Diameter

Pada Gambar 4.4 menunjukkan perbandingan frekuensi natural *drill pipe* dari masing-masing grade dengan panjang yang sama namun dengan diameter yang berbeda. *Drill pipe* dengan grade S-135 memiliki diameter luar 5 inci dan diameter dalam 4,276 inci, *drill pipe* dengan grade V-150 memiliki diameter luar 5,875 inci dan diameter dalam 5,045 inci, *drill pipe* dengan grade Z-140 memiliki diameter luar 4,5 inci dan diameter dalam 3,826 inci. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa *drill pipe* dengan grade V-150 memiliki frekuensi natural yang lebih besar, sedangkan frekuensi natural yang terkecil dimiliki oleh *drill pipe* dengan grade Z-140. Hasil ini memperlihatkan bahwa semakin besar

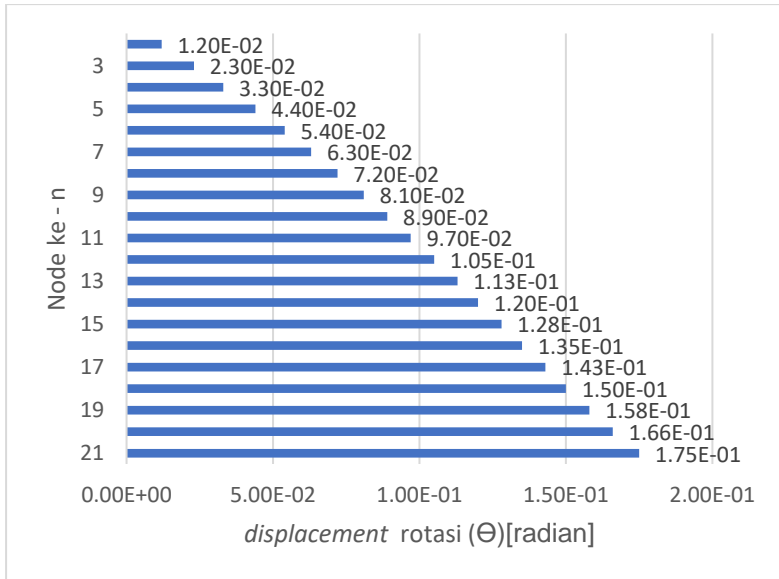
diameter dalam dan diameter luar *drill pipe* maka semakin besar pula frekuensi naturalnya.

4.1.2. *Drill Pipe* dengan Grade S-135

Dilakukan perhitungan *displacement drill pipe* berdasarkan variasi diameter dengan menggunakan Mathcad. Hasil *displacement* saat *spudding in* dapat dilihat pada Gambar 4.5 untuk *displacement* translasi (v) dan Gambar 4.6 untuk *displacement* rotasi (Θ).



Gambar 4. 5 *Displacement* Translasi *Spudding In* Grade S-135

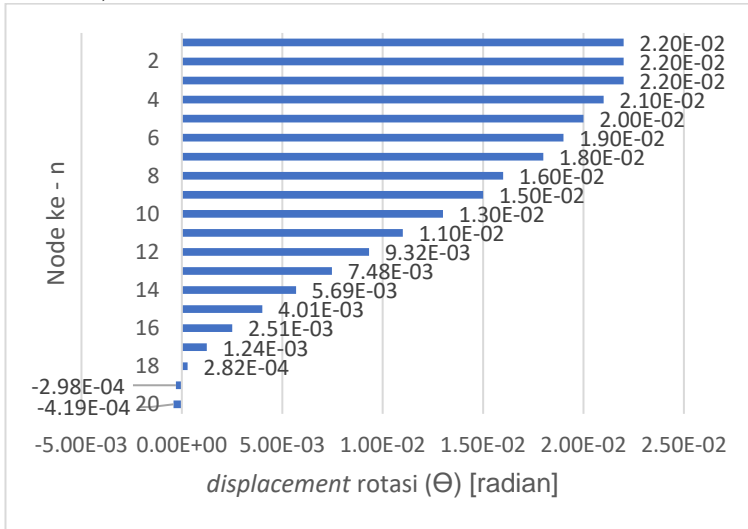


Gambar 4. 6 Displacement Rotasi Spudding In Grade S-135

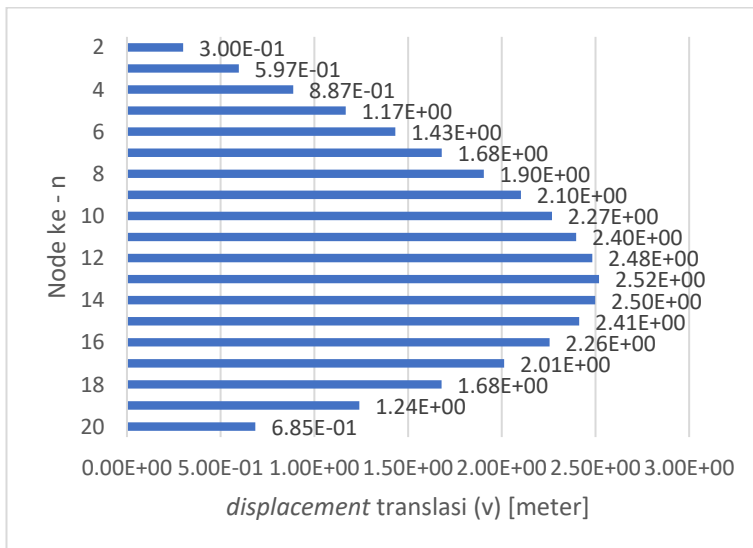
Gambar 4.5 dan Gambar 4.6 merupakan *displacement* translasi dan rotasi *drill pipe* grade S-135 saat keadaan *spudding in*. *Spudding in* adalah keadaan dimana *drill pipe* baru akan memulai pengeboran sehingga *drill bit* yang merupakan bagian terbawah dari rangkaian *drill string* belum mengenai dasar laut. Dalam keadaan *spudding in* *drill pipe* tidak diberikan torsi. Pada keadaan ini *drill pipe* mendapatkan beban aliran laminar berupa gaya (Y) dan momen (M) yang berasal dari tekanan air laut.

Dari kedua grafik tersebut menunjukkan bahwa semakin besar node *drill pipe* yang berarti semakin dalam *drill pipe* mencapai kedalaman di laut maka semakin besar *displacement* translasi dan rotasinya. *Displacement* translasi pada node ke-2 dan node ke-21 sebesar 0,079 m dan 22,449 m. Sedangkan *displacement* rotasi pada node ke-2 dan node ke-21 sebesar 0,012 radian dan 0,175 radian. Pada kondisi *spudding in*, nilai *displacement* translasi terbesar terdapat pada node ke - 21 sebesar

22,4 m dan *displacement* rotasi terbesar terdapat pada node ke – 21 sebesar 0,175 radian.



Gambar 4. 7 *Displacement Rotasi Drilling Grade S-135*



Gambar 4. 8 *Displacement Translasi Drilling Grade S-135*

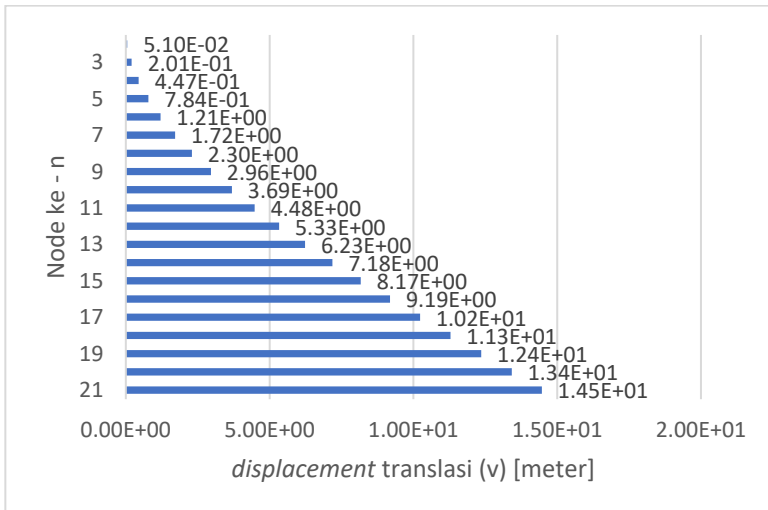
Gambar 4.7 dan Gambar 4.8 merupakan *displacement* translasi dan rotasi *drill pipe* grade S-135 saat keadaan *drilling*. Keadaan *drilling* adalah keadaan dimana *drill bit* yang merupakan bagian terbawah dari *drill string* sudah menyentuh tanah sehingga node terbawah dimatikan. Saat keadaan *drilling*, torsi diberikan pada *drill pipe*. Pada keadaan ini *drill pipe* mendapatkan beban berupa gaya (Y) yang berasal dari tekanan air laut dan momen (M) yang berasal dari torsi dan tekanan air laut.

Gambar 4.7 menunjukkan bahwa semakin dalam *drill pipe* mencapai kedalaman di laut maka semakin kecil *displacement* rotasinya. *Displacement* rotasi pada node ke-1 dan node ke-20 sebesar 0,022 radian dan -0,000419 radian

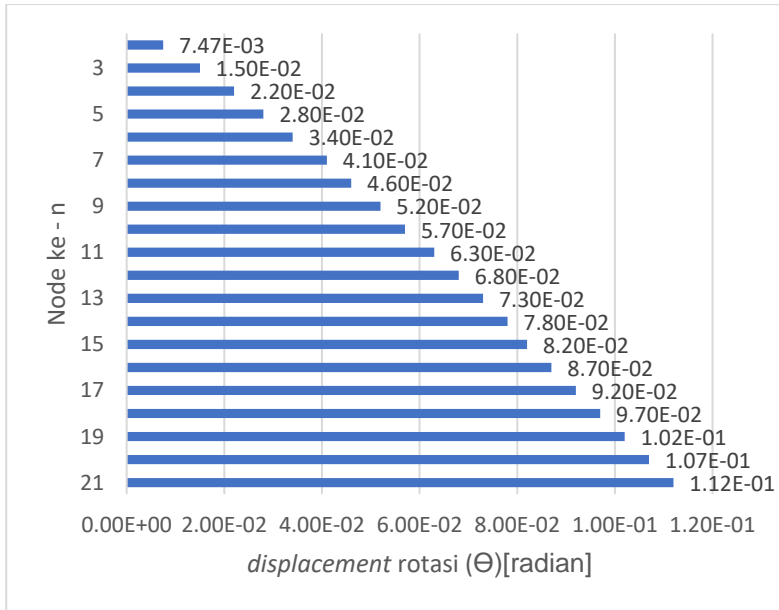
Gambar 4.8 menunjukkan bahwa *displacement* translasi terbesar saat keadaan *drilling* berada pada node 13 atau berada pada elemen 12 dengan nilai 2,52 m.

4.1.3. Drill Pipe dengan Grade V-150

Drill Pipe dengan Grade V-150 diberikan torsi sebesar 30.300 ft-lbs. *Displacement* translasi (v) dan *Displacement* rotasi (Θ) saat keadaan *spudding in* dari grade ini dapat dilihat pada Gambar 4.9 dan Gambar 4.10



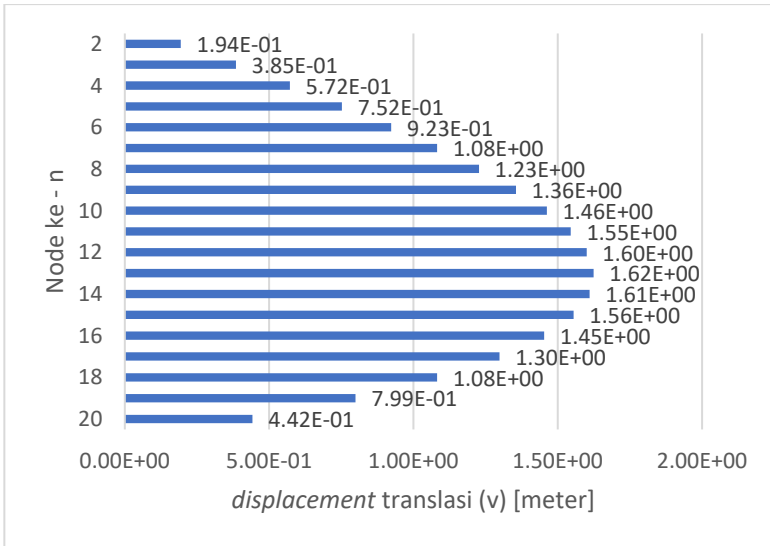
Gambar 4. 9 *Displacement* Translasi *Spudding In* Grade V-150



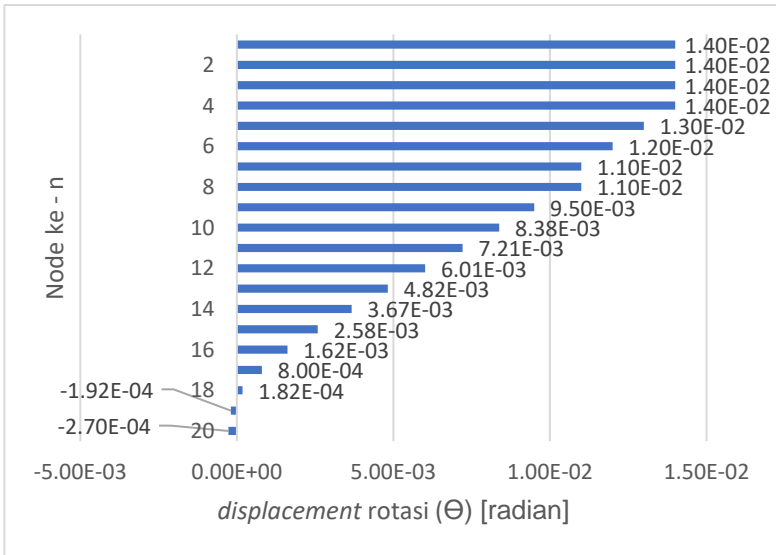
Gambar 4. 10 *Displacement Rotasi Spudding In Grade V-150*

Gambar 4.9 dan Gambar 4.10 merupakan *displacement* translasi dan *displacement* rotasi *drill pipe* grade V-150 saat keadaan *spudding in*. Dalam keadaan *spudding in drill pipe* tidak diberikan torsi. Pada keadaan ini *drill pipe* mendapatkan beban berupa gaya (Y) dan momen (M) yang berasal dari tekanan air laut.

Kedua grafik tersebut menunjukkan bahwa semakin besar node *drill pipe* yang berarti semakin dalam *drill pipe* mencapai kedalaman di laut maka semakin besar *displacement* translasi dan *displacement* rotasinya. *Displacement* translasi pada node ke-2 dan node ke-21 sebesar 0,051 m dan 14,5 m. Sedangkan *displacement* rotasi pada node ke-2 dan node ke-21 sebesar 0,00747 radian dan 0,112 radian. Pada saat *spudding* nilai *displacement* translasi terbesar berada pada node 21 yaitu 14,5 m dan *displacement* rotasi terbesar berada pada node 21 yaitu 0,112 radian.



Gambar 4. 11 Displacement Translasi Drilling Grade V-150



Gambar 4. 12 Displacement Rotasi Drilling Grade V-150

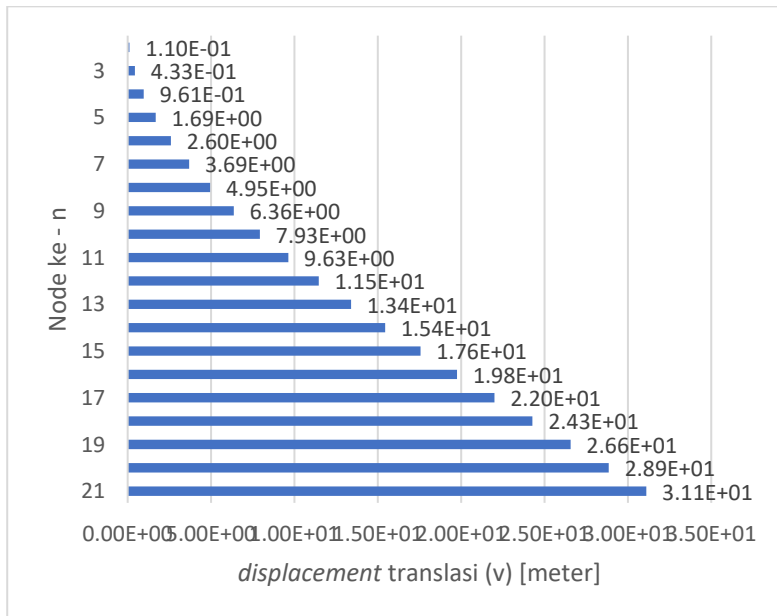
Gambar 4.11 dan Gambar 4.12 merupakan *displacement* translasi dan *displacement* rotasi *drill pipe* grade V-150 saat keadaan *drilling*. Pada keadaan ini *drill pipe* mendapatkan beban berupa gaya (Y) yang berasal dari tekanan air laut dan momen (M) yang berasal dari torsi dan tekanan air laut.

Gambar 4.11 menunjukkan bahwa *displacement* translasi terbesar saat keadaan *drilling* berada pada node 13 atau berada pada elemen 12 dengan nilai 1,62 m.

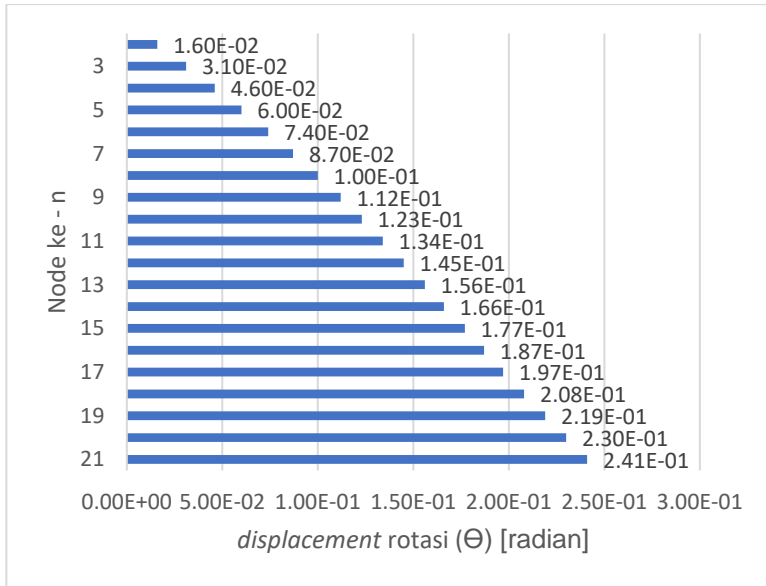
Gambar 4.12 menunjukkan bahwa semakin dalam *drill pipe* mencapai kedalaman di laut maka semakin kecil *displacement* rotasinya. *Displacement* rotasi pada node ke-1 dan node ke-20 sebesar 0,014 radian dan -0,00027 radian.

4.1.4. Drill Pipe dengan Grade Z-140

Drill Pipe dengan Grade Z-140 memiliki *displacement* translasi (v) dan *displacement* rotasi (Θ) yang dapat dilihat pada Gambar 4.13 dan Gambar 4.14



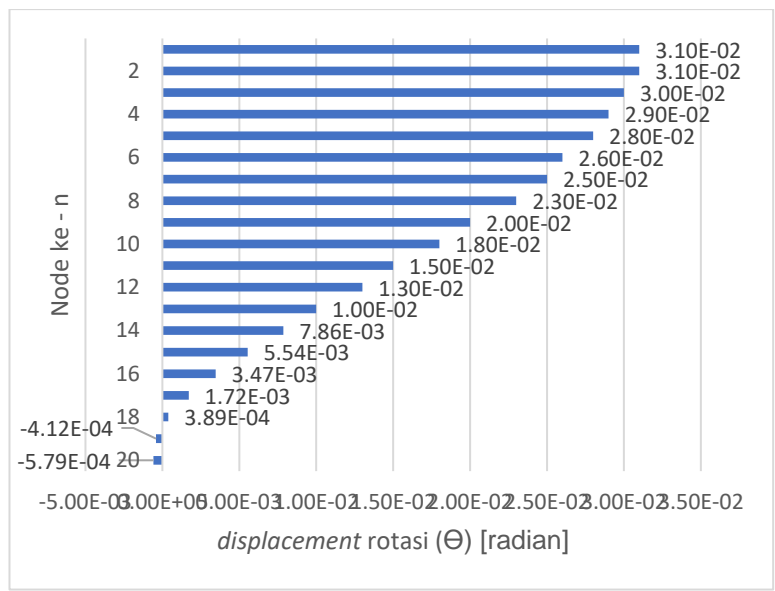
Gambar 4. 13 *Displacement* Translasi *Spudding In* Grade Z-140



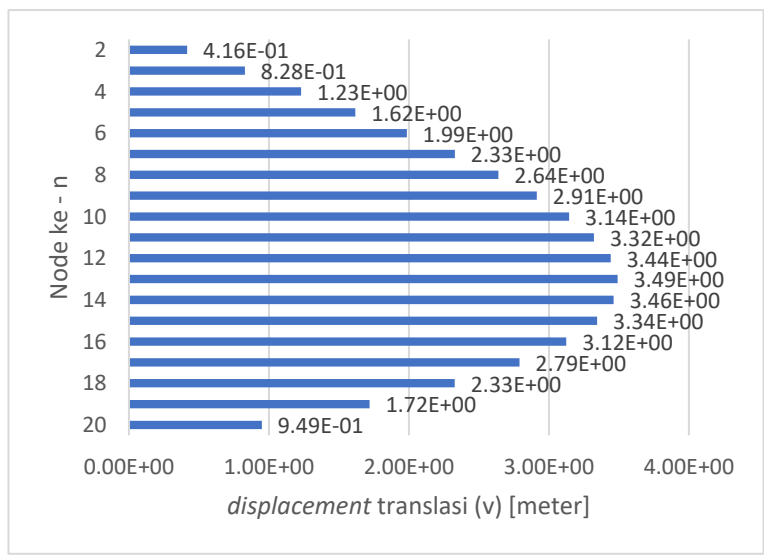
Gambar 4. 14 *Displacement Rotasi Spudding In Grade Z-140*

Gambar 4.13 dan Gambar 4.14 merupakan merupakan *displacement* translasi dan rotasi *drill pipe* grade Z-140 saat keadaan *spudding in*. Dalam keadaan *spudding in drill pipe* tidak diberikan torsi. Pada keadaan ini *drill pipe* mendapatkan beban berupa gaya (Y) dan momen (M) yang berasal dari tekanan air laut.

Kedua grafik tersebut menunjukkan bahwa semakin besar node *drill pipe* yang berarti semakin dalam *drill pipe* mencapai kedalaman di laut maka semakin besar *displacement* translasi dan rotasinya. *Displacement* translasi pada node ke-2 dan node ke-21 sebesar 0,11 m dan 31,109 m. Sedangkan *displacement* rotasi pada node ke-2 dan node ke-21 sebesar 0,016 radian dan 0,241 radian. Pada saat *spudding in*, nilai *displacement* translasi terbesar berada pada node 21 atau pada elemen 20 sebesar 31,1 m dan *displacement* rotasi terbesar berada pada node 21 sebesar 0,241 radian..



Gambar 4. 15 Displacement Rotasi Drilling Grade Z-140

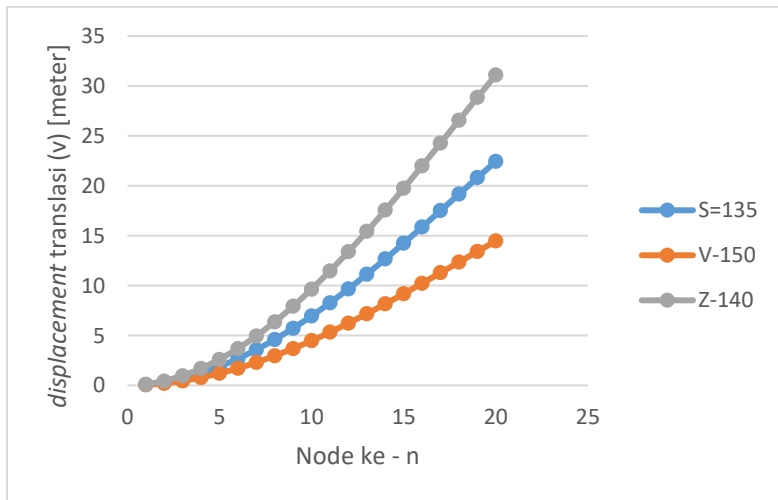


Gambar 4. 16 Displacement Translasi Drilling Grade Z-140

Gambar 4.15 dan Gambar 4.16 merupakan *displacement* rotasi dan translasi *drill pipe* grade Z-140 saat keadaan *drilling*. Pada keadaan ini *drill pipe* mendapatkan beban berupa gaya (Y) yang berasal dari tekanan air laut dan momen (M) yang berasal dari torsi dan tekanan air laut.

Gambar 4.15 menunjukkan bahwa semakin dalam *drill pipe* mencapai kedalaman di laut maka semakin kecil *displacement* rotasinya. *Displacement* rotasi pada node ke-1 dan node ke-20 sebesar 0,031 radian dan -0,000579 radian.

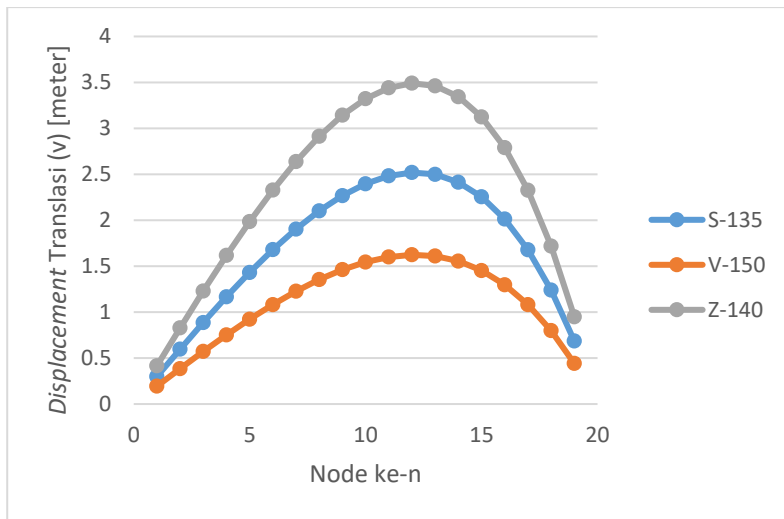
Gambar 4.16 menunjukkan bahwa *displacement* translasi terbesar saat keadaan *drilling* berada pada node 13 atau berada pada elemen 12 dengan nilai 3,49 m.



Gambar 4. 17 Perbandingan *Displacement* Translasi *Spudding in* Variasi Diameter

Gambar 4.17 merupakan grafik perbandingan *displacement* translasi saat kondisi *spudding in*. Tiga grade *drill pipe* ini memiliki panjang yang sama yaitu 44,5 feet namun dengan diameter dalam dan diameter luar yang berbeda. *Drill pipe* dengan variasi diameter memiliki 20 sambungan atau 20 elemen untuk

mencapai kedalaman 270 meter. Dari grafik tersebut dapat terlihat bahwa *displacement* translasi terkecil dengan kondisi *spudding in* yaitu *drill pipe* dengan grade V-150 yang memiliki diameter dalam dan diameter luar yang lebih besar dibandingkan dengan *drill pipe* grade S-135 dan grade Z-140 yaitu 5,875 inchi untuk diameter luar dan 5,045 inchi untuk diameter dalam. Hasil tersebut menunjukkan bahwa *drill pipe* yang memiliki spesifikasi diameter luar dan diameter dalam lebih besar akan mempunyai simpangan yang lebih kecil.



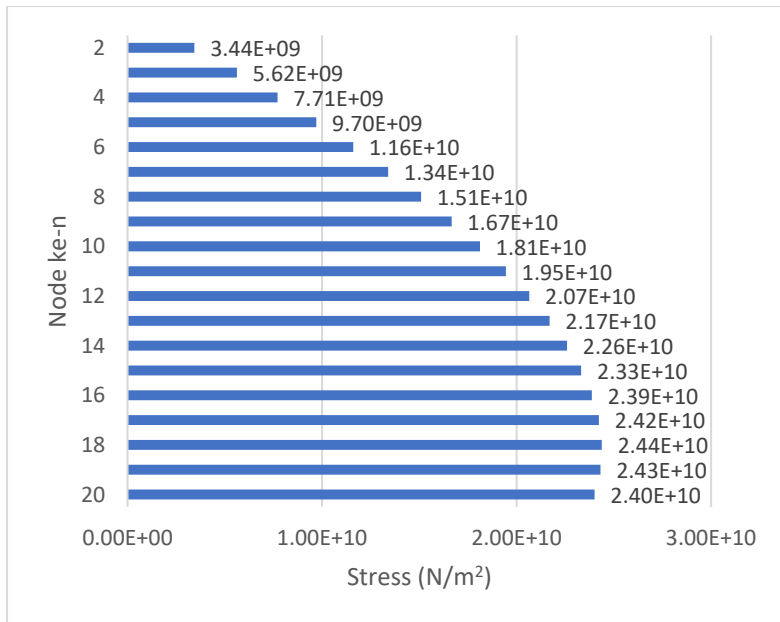
Gambar 4. 18 Perbandingan *Displacement* Translasi *Drilling* Variasi Diameter

Gambar 4.18 merupakan grafik perbandingan *displacement* translasi saat kondisi *drilling*. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa *drill pipe* yang memiliki *displacement* terkecil yaitu *drill pipe* dengan grade V-150 yang memiliki diameter dalam dan diameter luar yang lebih besar dibandingkan dengan *drill pipe* grade S-135 dan grade Z-140 yaitu 5,875 inchi untuk diameter luar dan 5,045 inchi untuk diameter dalam. Hasil tersebut juga menunjukkan bahwa *drill pipe* yang memiliki spesifikasi diameter

luar dan diameter dalam lebih besar akan mempunyai simpangan yang lebih kecil.

4.1.5. *Stress-Strain* dengan Grade S-135

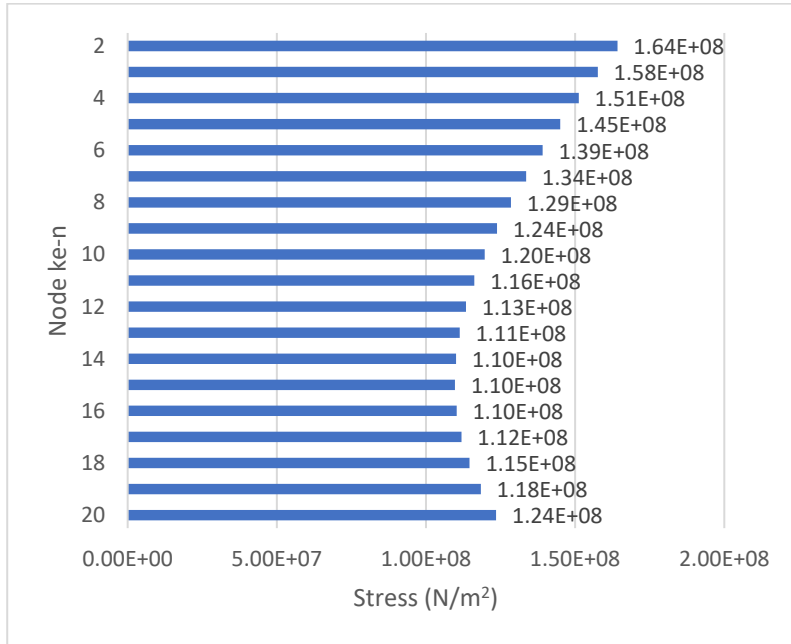
Dilakukan perhitungan *stress-strain* pada setiap sambungan *drill pipe* dengan menggunakan Mathcad. *Stress* pada sambungan *drill pipe* dengan grade S-135 variasi diameter dapat dilihat pada Gambar 4.19 untuk *stress* translasi, dan Gambar 4.20 untuk *stress* rotasi (puntir)



Gambar 4. 19 *Stress* Translasi *Drill Pipe* Grade S-135 saat *Spudding In*

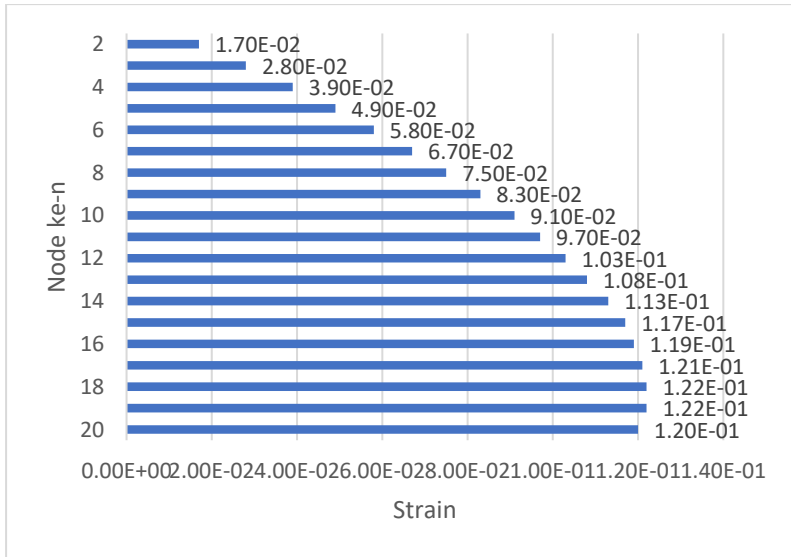
Gambar 4.19 menunjukkan *stress* translasi pada setiap sambungan *drill pipe* saat keadaan *spudding in* nilainya semakin besar dengan bertambahnya kedalaman air laut, ini terjadi karena pengaruh tekanan air laut yang semakin kedalam semakin besar tekanannya, sehingga gaya yang mengenai *drill pipe* semakin

kedalam semakin besar. *Stress* translasi pada node ke-2 dan node ke-20 sebesar $3,44 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ dan $2,40 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$.

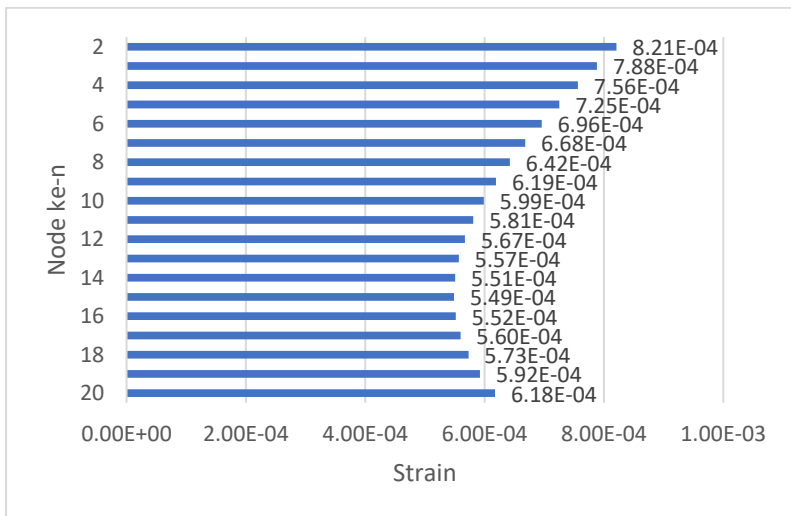


Gambar 4. 20 *Stress Rotasi Drill Pipe Grade S-135 saat Spudding In*

Gambar 4.20 menunjukkan *stress* rotasi *drill pipe* saat *spudding in* dengan grade S-135. Nilai *stress* maksimum pada kondisi *spudding in* berada pada node 2 dengan nilai $1,64 \times 10^8 \text{ N/m}^2$.



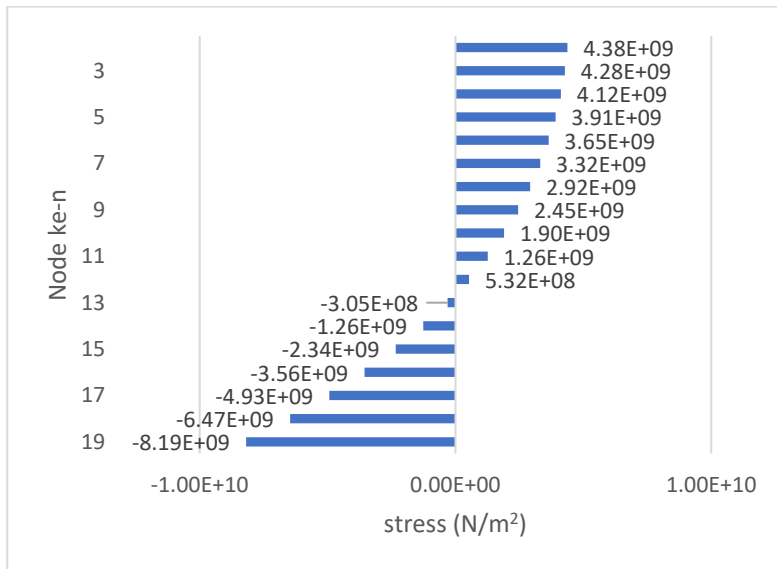
Gambar 4. 21 *Strain Translasi Drill Pipe Grade S-135 saat Spudding In*



Gambar 4. 22 *Strain Rotasi Drill Pipe Grade S-135 saat Spudding In*

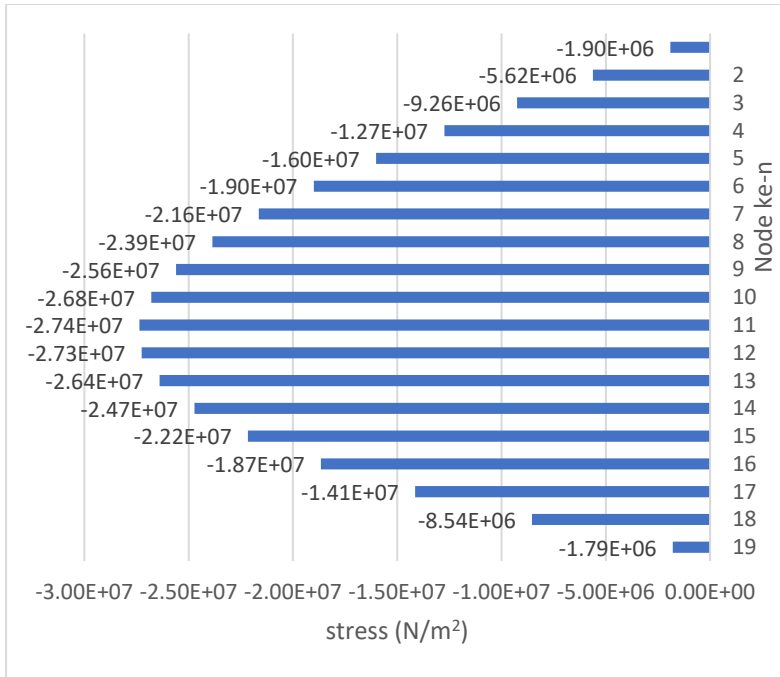
Gambar 4.21 dan Gambar 4.22 merupakan *strain* translasi dan rotasi pada sambungan *drill pipe* saat keadaan *spudding in*. Dari Gambar 4.21 *strain* translasi maksimum berada pada node 18 dan node 19 dengan nilai 0,122. Sedangkan *strain* translasi minimum berada pada node 2 dengan nilai 0,017.

Dari Gambar 4.22 dapat dilihat bahwa *strain* rotasi maksimum saat *spudding in* berada pada node 2 dengan nilai 0,000821 sedangkan *strain* rotasi minimum berada pada node 15 dengan nilai 0,000549.



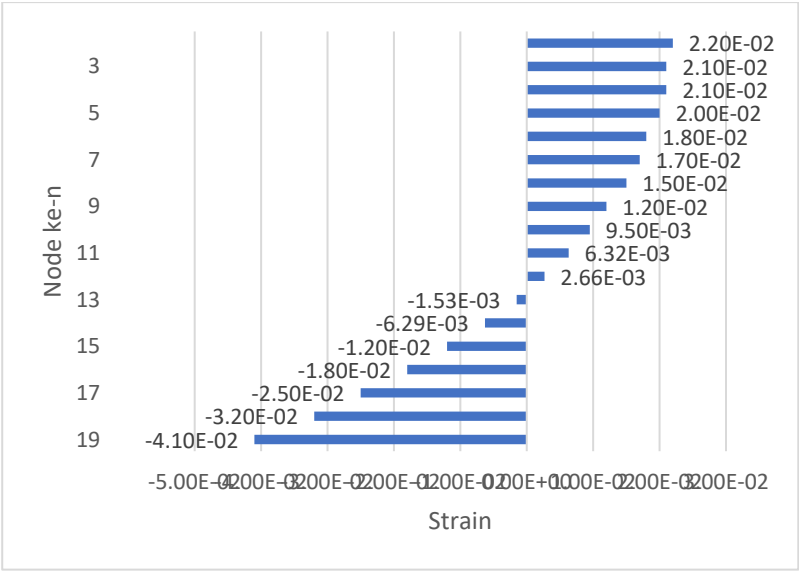
Gambar 4. 23 *Stress* Translasi *Drill Pipe* Grade S-135 saat *Drilling*

Gambar 4.23 merupakan *stress* translasi *drill pipe* dengan grade S-135 saat keadaan *drilling*. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa *stress* maksimum *drill pipe* berada pada node 19 dengan nilai $-8,19 \times 10^9 \text{ N/m}^2$.

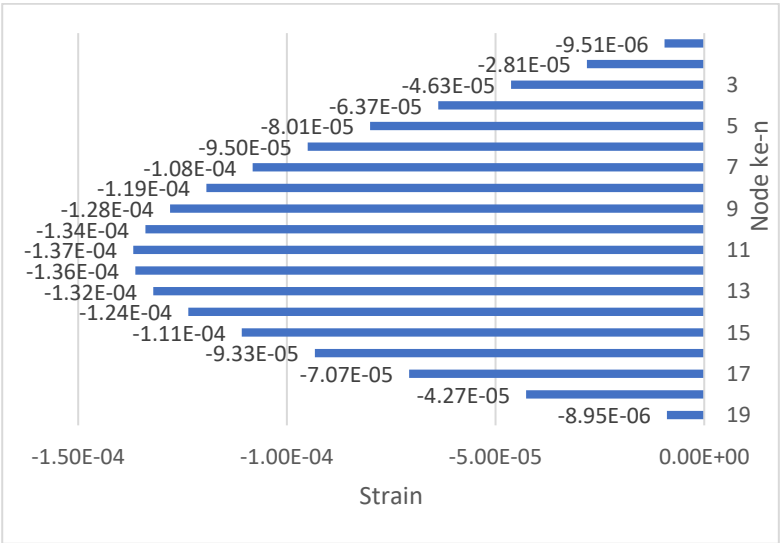


Gambar 4. 24 *Stress Rotasi Drill Pipe Grade S-135 saat Drilling*

Gambar 4.24 merupakan *stress* rotasi *drill* pipe dengan grade S-135 saat keadaan *drilling*. Dari gambar tersebut menunjukkan bahwa *stress* rotasi *drill* pipe semakin kebawah semakin membesar dengan nilai *stress* terkecil berada pada node ke-2 yaitu $-1,90 \times 10^6$ N/m² dan *stress* terbesar berada pada node ke-11 yaitu $-2,74 \times 10^7$ N/m².



Gambar 4. 25 *Strain Translasi Drill Pipe Grade S-135 saat Drilling*



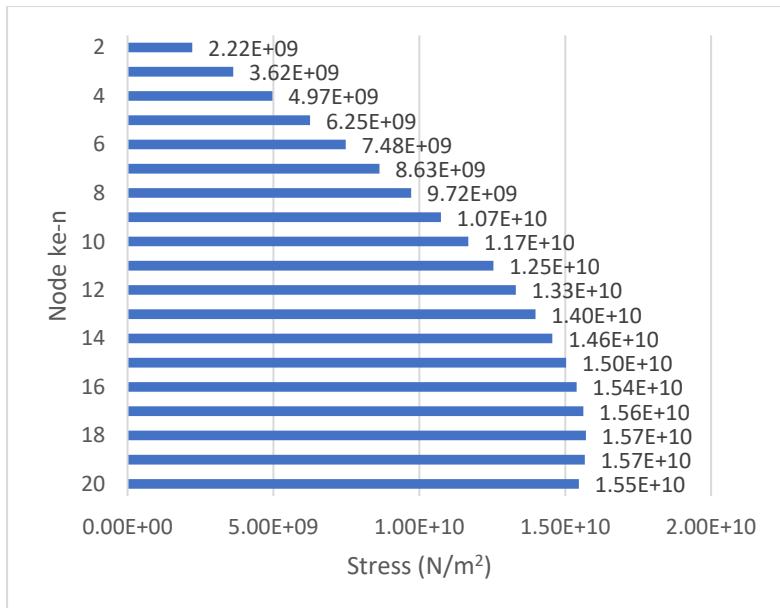
Gambar 4. 26 *Strain Rotasi Drill Pipe Grade S-135 saat Drilling*

Gambar 4.25 dan Gambar 4.26 merupakan grafik *strain* translasi dan *strain* rotasi *drill pipe* dengan grade S-135 saat keadaan *drilling*. Gambar 4.25 menunjukkan *strain* translasi maksimum *drill pipe* berada pada node 19 dengan nilai -0,041

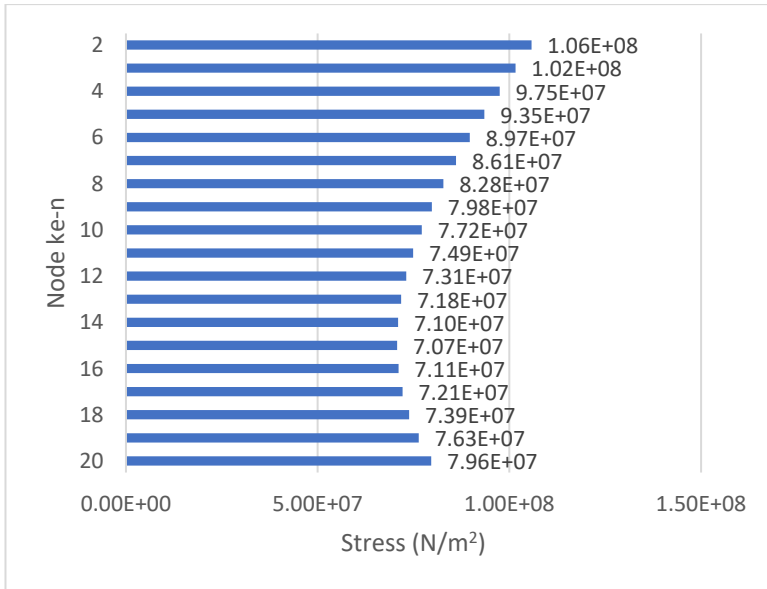
Dari Gambar 4.26 menunjukkan bahwa *strain* rotasi *drill pipe* semakin kebawah semakin membesar, *strain* rotasi terbesar berada pada node 11 dan 12 dengan nilai -0,000137 sedangkan nilai *strain* rotasi terkecil berada pada node ke-1 dengan nilai -0,00000951.

4.1.6. Stress-Strain dengan Grade V-150

Dilakukan perhitungan *stress-strain* pada setiap sambungan *drill pipe* dengan menggunakan Mathcad. *Stress* pada sambungan *drill pipe* dengan grade V-150 variasi diameter dapat dilihat pada Gambar 4.27 untuk *stress* translasi, dan Gambar 4.28 untuk *stress* rotasi (puntir)



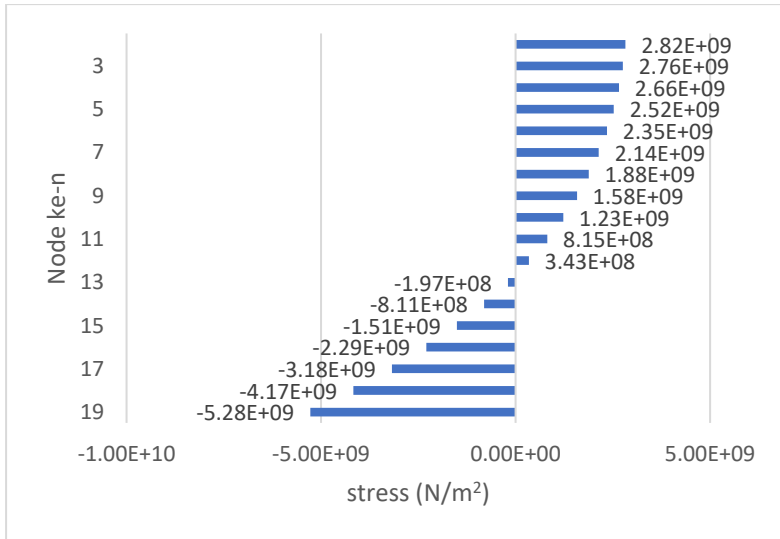
Gambar 4. 27 *Stress* Translasi *Drill Pipe* Grade V-150 saat *Spudding In*



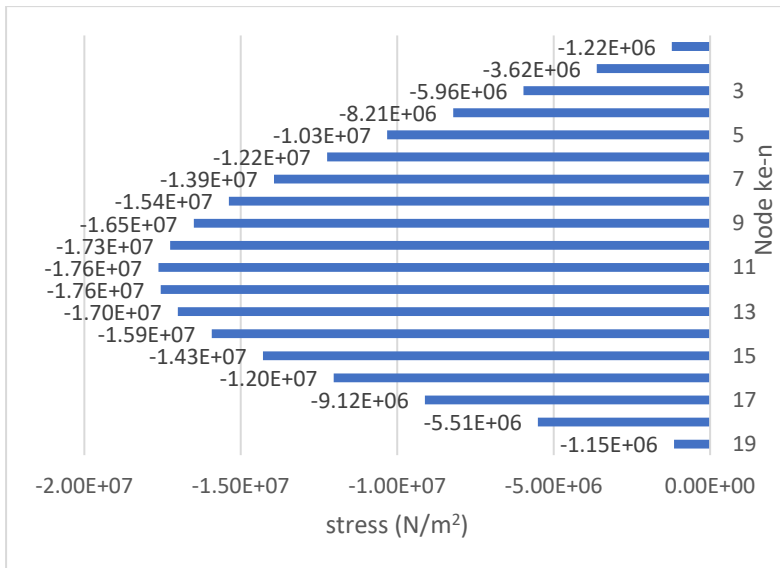
Gambar 4. 28 *Stress Rotasi Drill Pipe Grade V-150 saat Spudding In*

Gambar 4.27 dan Gambar 4.28 menunjukkan bahwa *stress* translasi dan rotasi pada setiap sambungan *drill pipe* saat keadaan *spudding in*. berdasarkan Gambar 4.27 *stress* translasi maksimum *drill pipe* berada pada node 18 dengan nilai $1,57 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ dan nilai *stress* translasi minimum berada pada node 2 dengan nilai $2,22 \times 10^9 \text{ N/m}^2$.

Berdasarkan Gambar 4.28 *stress* rotasi maksimum *drill pipe* berada pada node 2 dengan nilai $1,06 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ dan nilai minimum *stress* rotasi berada pada node 15 dengan nilai $7,07 \times 10^7 \text{ N/m}^2$.



Gambar 4. 29 *Stress Translasi Drill Pipe Grade V-150 saat Drilling*

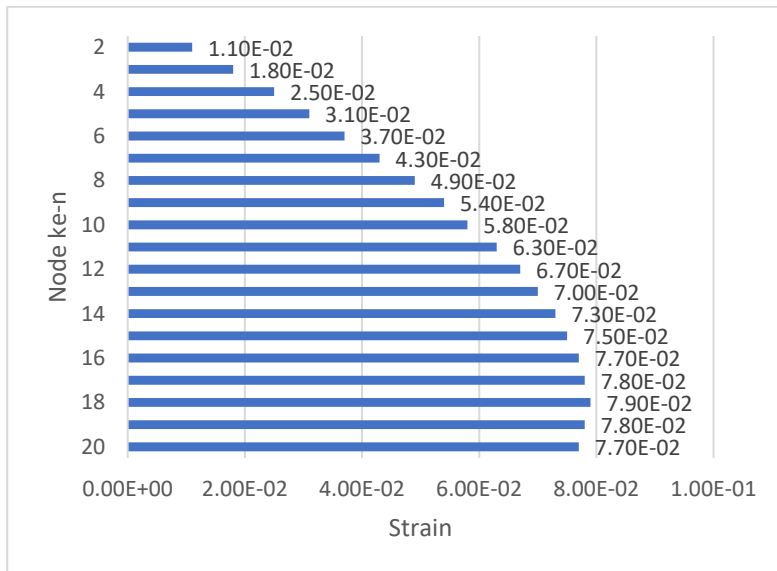


Gambar 4. 30 *Stress Rotasi Drill Pipe Grade V-150 saat Drilling*

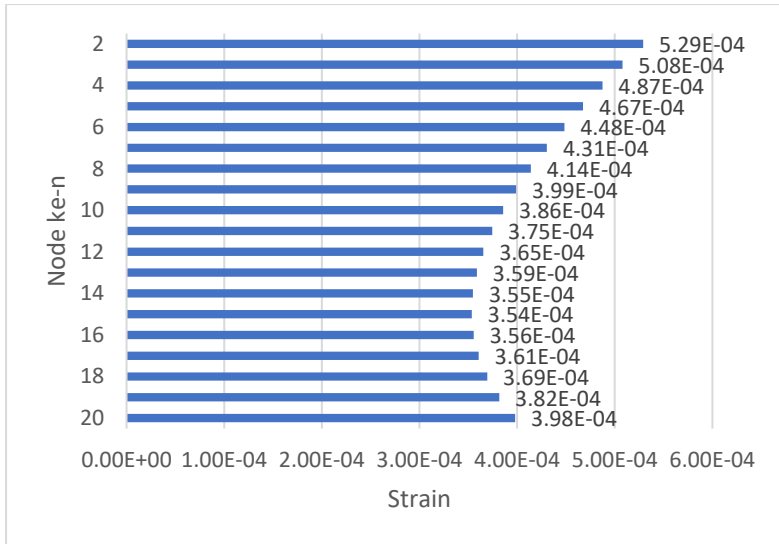
Gambar 4.29 menunjukkan nilai *stress* translasi maksimum *drill pipe* saat *drilling* berada pada node 19 dengan nilai $-5,28 \times 10^9 \text{ N/m}^2$.

Gambar 4.30 menunjukkan bahwa *stress* rotasi pada setiap sambungan *drill pipe* saat keadaan *drilling* nilainya semakin membesar dengan bertambahnya kedalaman air laut. *Stress* rotasi *drill pipe* grade V-150 pada node ke-1 sebesar $-1,22 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ dan nilai terbesar berada pada node 11 dengan nilai $-1,76 \times 10^7 \text{ N/m}^2$.

Strain translasi dan *strain* rotasi sambungan *drill pipe* dengan grade V-150 saat keadaan *spudding in* ditunjukkan pada Gambar 4.31 dan Gambar 4.32



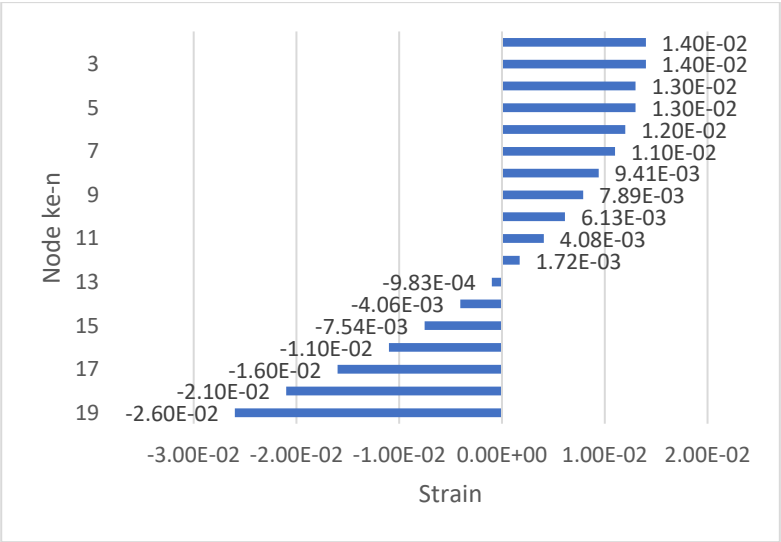
Gambar 4. 31 *Strain* Translasi *Drill Pipe* Grade V-150 saat *Spudding In*



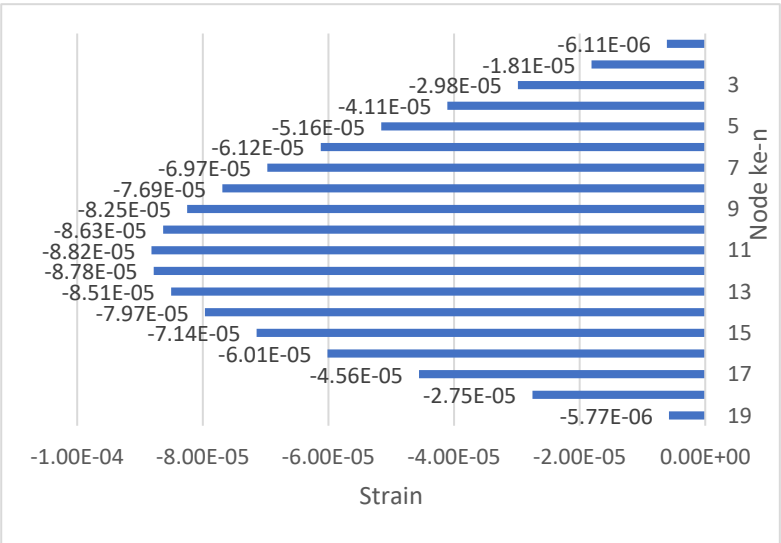
Gambar 4. 32 *Strain Rotasi Drill Pipe Grade V-150 saat Spudding In*

Dari Gambar 4.31 dan Gambar 4.32 menunjukkan bahwa *strain* translasi dan *strain* rotasi pada sambungan *drill pipe* dengan grade V-150 saat keadaan *spudding in*. Dari Gambar 4.31 *strain* translasi maksimum *drill pipe* berada pada node 18 dengan nilai 0,079 sedangkan *strain* translasi minimum berada pada node 2 dengan nilai 0,011.

Berdasarkan Gambar 4.32 *strain* rotasi maksimum *drill pipe* berada pada node 2 dengan nilai 0,000529 dan *strain* minimum berada pada node 15 dengan nilai 0,000354.



Gambar 4. 33 *Strain Translasi Drill Pipe Grade V-150 saat Drilling*



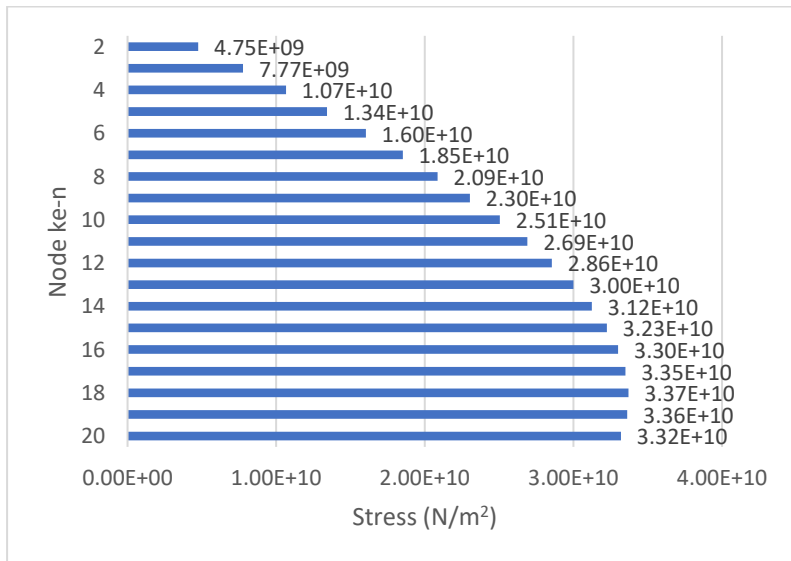
Gambar 4. 34 *Strain Rotasi Drill Pipe Grade V-150 saat Drilling*

Gambar 4.33 menunjukkan nilai *strain* translasi *drill pipe* grade V-150 saat *drilling*. Nilai *strain* translasi maksimum berada pada node 19 dengan nilai -0,026.

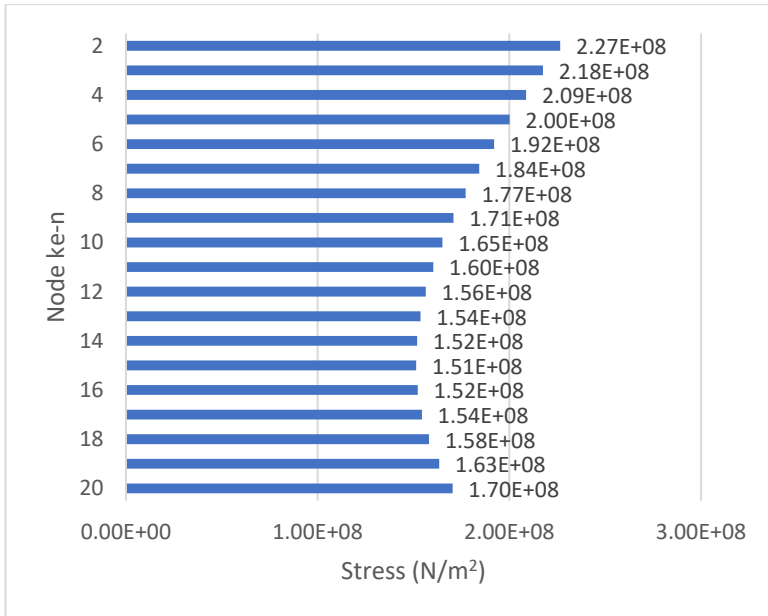
Gambar 4.34 menunjukkan bahwa *strain* rotasi pada sambungan *drill pipe* dengan grade V-150 saat keadaan *drilling* semakin membesar dengan bertambahnya kedalaman air laut. *Strain* rotasi *drill pipe* dengan grade V-150 pada node ke-1 sebesar -0,00000611 dan nilai terbesar pada node 11 yaitu 0,0000878.

4.1.7. Stress-Strain dengan Grade Z-140

Dilakukan perhitungan *stress-strain* pada setiap sambungan *drill pipe* dengan menggunakan Mathcad. *Stress* pada sambungan *drill pipe* dengan grade Z-140 variasi diameter dapat dilihat pada Gambar 4.35 untuk *stress* translasi dan Gambar 4.36 untuk *stress* rotasi (puntir)



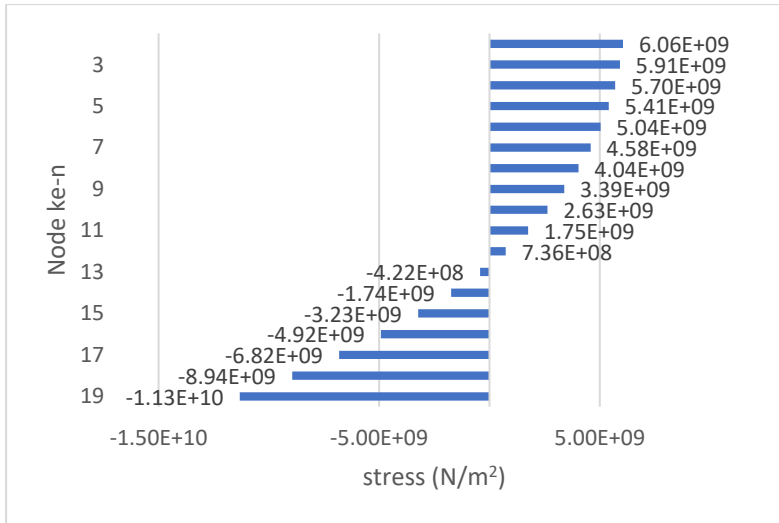
Gambar 4. 35 Stress Translasi Drill Pipe Grade Z-140 saat Spudding In



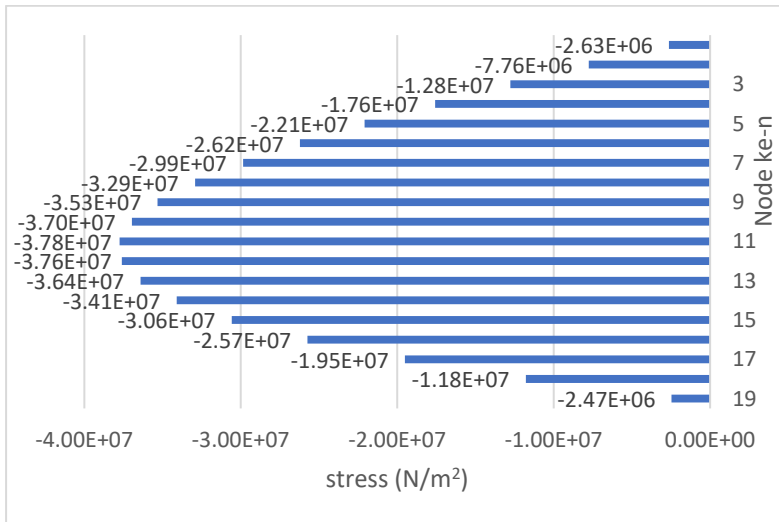
Gambar 4. 36 *Stress Rotasi Drill Pipe Grade Z-140 saat Spudding In*

Dari Gambar 4.35 nilai *stress* translasi maksimum *drill pipe* berada pada node 18 dengan nilai $3,37 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ sedangkan *stress* translasi minimum berada pada node 2 dengan nilai $4,75 \times 10^9 \text{ N/m}^2$.

Berdasarkan Gambar 4.36 *stress* rotasi maksimum *drill pipe* berada pada node 2 dengan nilai $2,27 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ dan *stress* rotasi minimum berada pada node 15 dengan nilai $1,51 \times 10^8 \text{ N/m}^2$.



Gambar 4. 37 *Stress Translasi Drill Pipe Grade Z-140 saat Drilling*

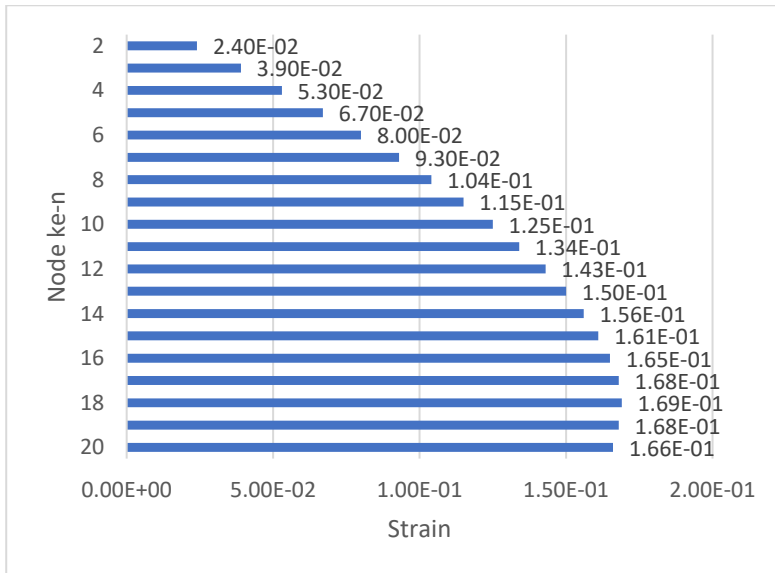


Gambar 4. 38 *Stress Rotasi Drill Pipe Grade Z-140 saat Drilling*

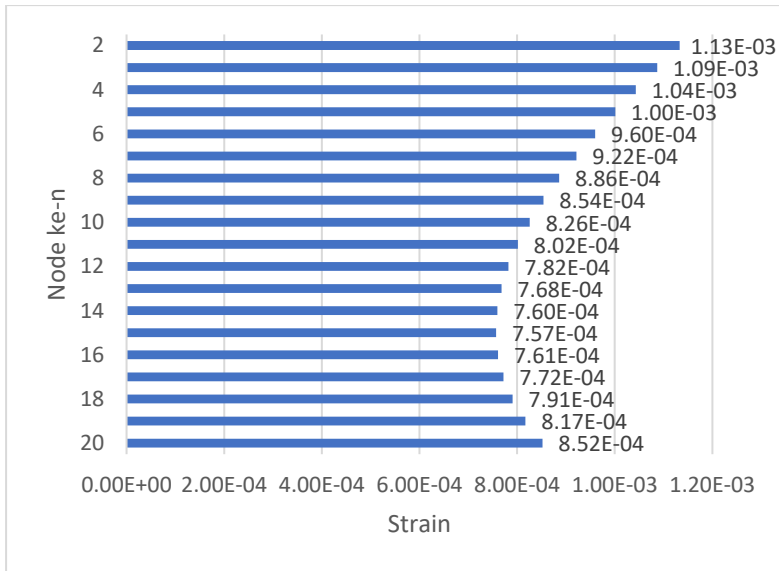
Gambar 4.37 menunjukkan nilai *stress* translasi *drill pipe* grade Z-140 saat *drilling*. Nilai *stress* maksimum *drill pipe* berada pada node 20 dengan nilai $-1,13 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$.

Gambar 4.38 menunjukkan bahwa *stress* rotasi pada setiap sambungan *drill pipe* saat keadaan *drilling* nilainya semakin membesar dengan bertambahnya kedalaman air laut. *Stress* rotasi *drill pipe* grade Z-140 pada node ke-1 sebesar $-2,63 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ dan nilai *stress* terbesar berada pada node 11 yaitu $-3,78 \times 10^7 \text{ N/m}^2$.

Strain translasi dan *strain* rotasi sambungan *drill pipe* dengan grade Z-140 saat keadaan *spudding in* ditunjukkan pada Gambar 4.39 dan Gambar 4.40



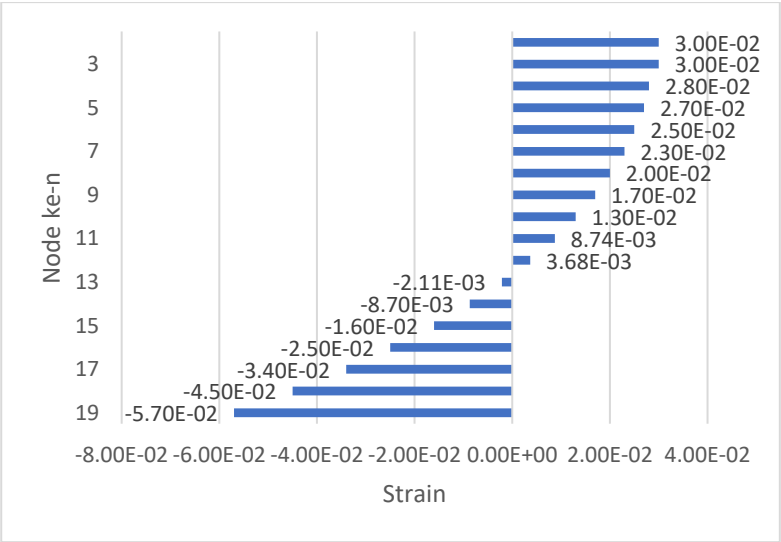
Gambar 4. 39 *Strain* Translasi *Drill Pipe* Grade Z-140 saat *Spudding In*



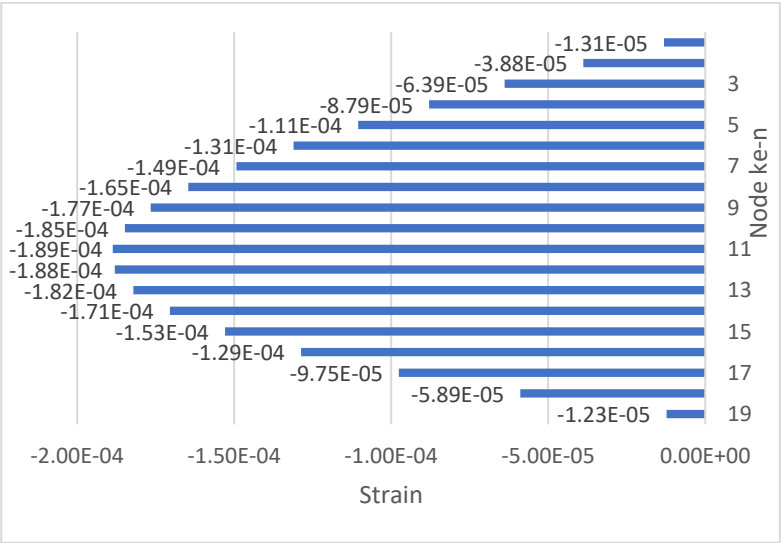
Gambar 4. 40 *Strain Rotasi Drill Pipe Grade Z-140 saat Spudding In*

Dari Gambar 4.39 nilai *strain* translasi maksimum *drill pipe* berada pada node 18 dengan nilai 0,169 sedangkan *strain* translasi minimum berada pada node 2 dengan nilai 0,024

Berdasarkan Gambar 4.40 *strain* rotasi maksimum *drill pipe* berada pada node 2 dengan nilai 0,00113 dan *strain* minimum berada pada node 15 dengan nilai 0,000757.



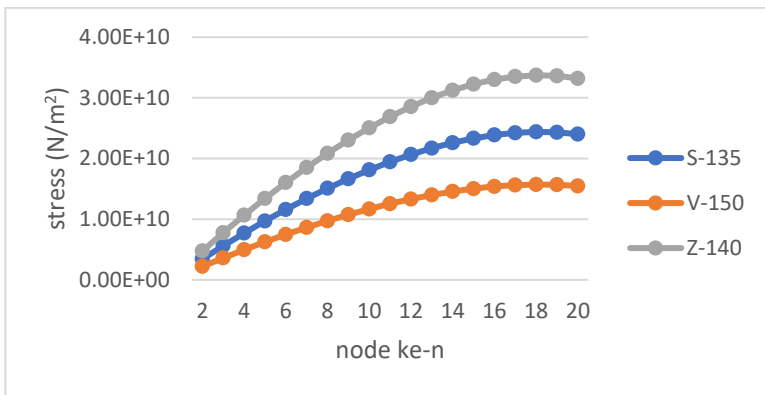
Gambar 4. 41 *Strain Translasi Drill Pipe Grade Z-140 saat Drilling*



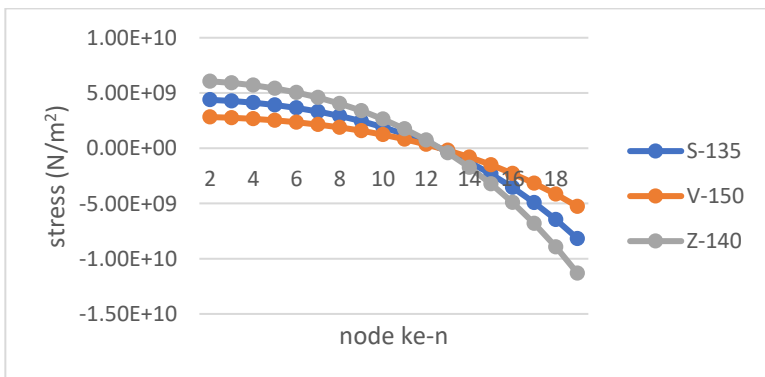
Gambar 4. 42 *Strain Rotasi Drill Pipe Grade Z-140 saat Drilling*

Gambar 4.41 menunjukkan nilai *strain* translasi *drill pipe* grade z-140 saat *drilling*. Nilai *strain* translasi maksimum berada pada node 20 dengan nilai -0,057

Gambar 4.42 menunjukkan bahwa *strain* rotasi pada sambungan *drill pipe* dengan grade Z-140 saat keadaan *drilling* semakin membesar dengan bertambahnya kedalaman air laut. *Strain* rotasi *drill pipe* dengan grade Z-140 pada node ke-1 sebesar -0,0000131 dan *strain* terbesar berada pada node 11 sebesar -0,000189



Gambar 4. 43 Perbandingan *Stress* Translasi *Drill Pipe* saat *Spudding In* Variasi Diameter

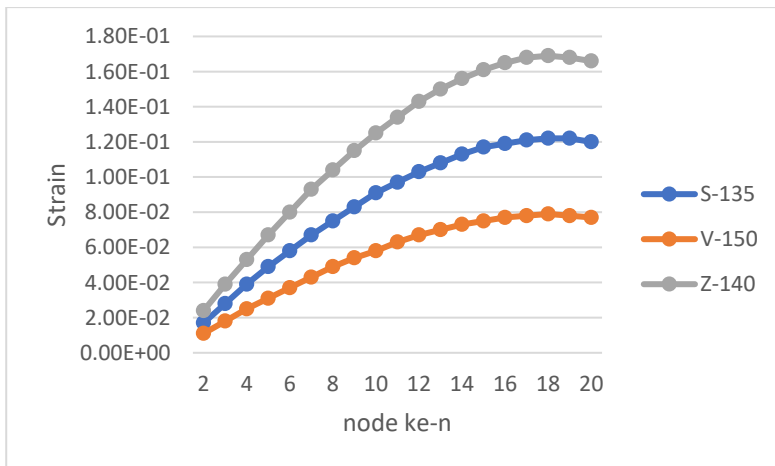


Gambar 4. 44 Perbandingan *Stress* Translasi *Drill Pipe* saat *Drilling* Variasi Diameter

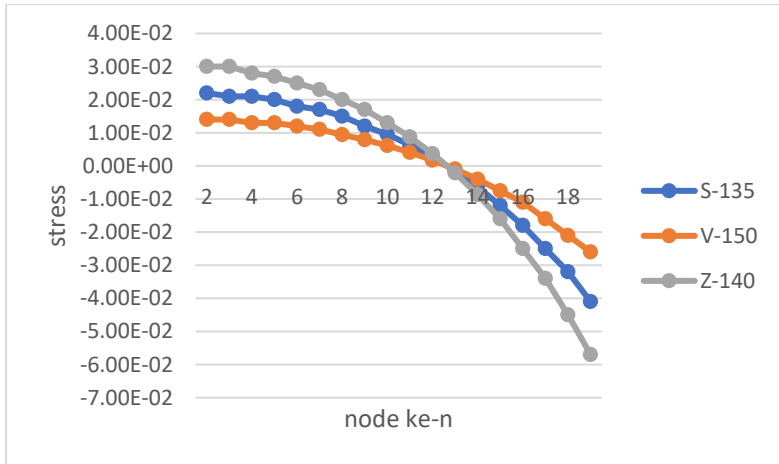
Dari Gambar 4.43 dan Gambar 4.44 dapat dilihat perbandingan *stress* translasi saat *spudding in* maupun *drilling* dari variasi diameter. Dari Gambar 4.43 Nilai *stress* translasi terbesar terjadi pada *drill pipe* dengan grade Z-140 yang memiliki nilai *stress* maksimum *drill pipe* berada pada node 18 dengan nilai $3,37 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ sedangkan *stress* translasi minimum berada pada node 2 dengan nilai $4,75 \times 10^9 \text{ N/m}^2$.

Dari Gambar 4.44 *stress* terbesar terjadi pada *drill pipe* dengan grade Z-140 dengan nilai *stress* maksimum *drill pipe* berada pada node 19 yaitu $-1,13 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$.

Dari hasil perhitungan dapat dilihat bahwa semakin kecil diameter dalam dan diameter luar maka semakin besar *stress* yang terjadi.



Gambar 4. 45 Perbandingan *Strain* Translasi *Drill Pipe* saat *Spudding In* Variasi Diameter



Gambar 4. 46 Perbandingan *Strain* Translasi *Drill Pipe* saat *Drilling* Variasi Diameter

Dari Gambar 4.45 dan Gambar 4.46 dapat dilihat perbandingan *strain* translasi saat *spudding in* maupun *drilling* dari variasi diameter. Dari Gambar 4.45 Nilai *strain* translasi terbesar terjadi pada *drill pipe* dengan grade Z-140 yang memiliki nilai *strain* maksimum *drill pipe* berada pada node 18 dengan nilai 0,169 sedangkan *strain* translasi minimum berada pada node 2 dengan nilai 0,024. Dari Gambar 4.46 *strain* terbesar terjadi pada *drill pipe* dengan grade Z-140 dengan nilai *strain* maksimum *drill pipe* berada pada node 19 yaitu -0,057.

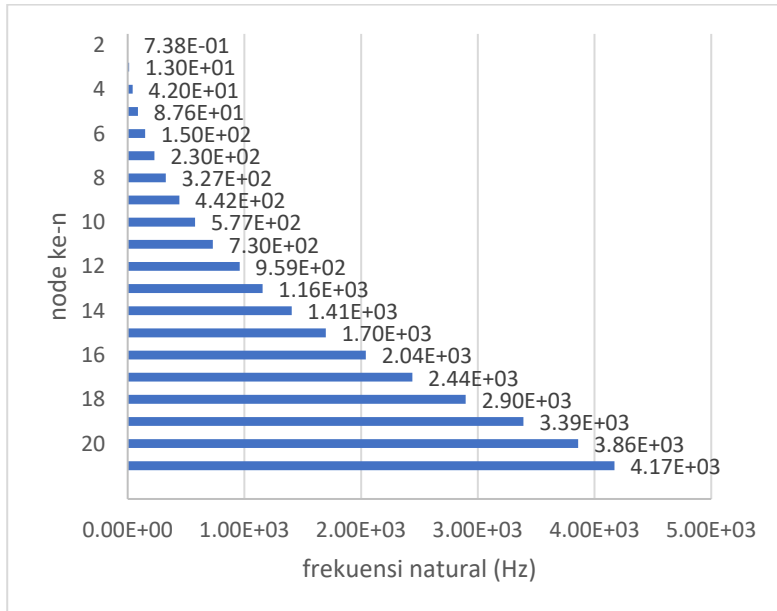
Dari hasil perhitungan dapat dilihat bahwa semakin kecil diameter dalam dan diameter luar maka semakin besar *strain* yang terjadi.

4.2. Variasi Panjang *Drill Pipe*

Terdapat tiga grade *drill pipe* dengan variasi panjang, yaitu grade S-135, grade G-105 dan grade Z-140. Masing-masing spesifikasi *drill pipe* dapat dilihat pada Tabel 3.2. torsi yang diberikan untuk semua grade yaitu sebsar 30.300 ft-lbs.

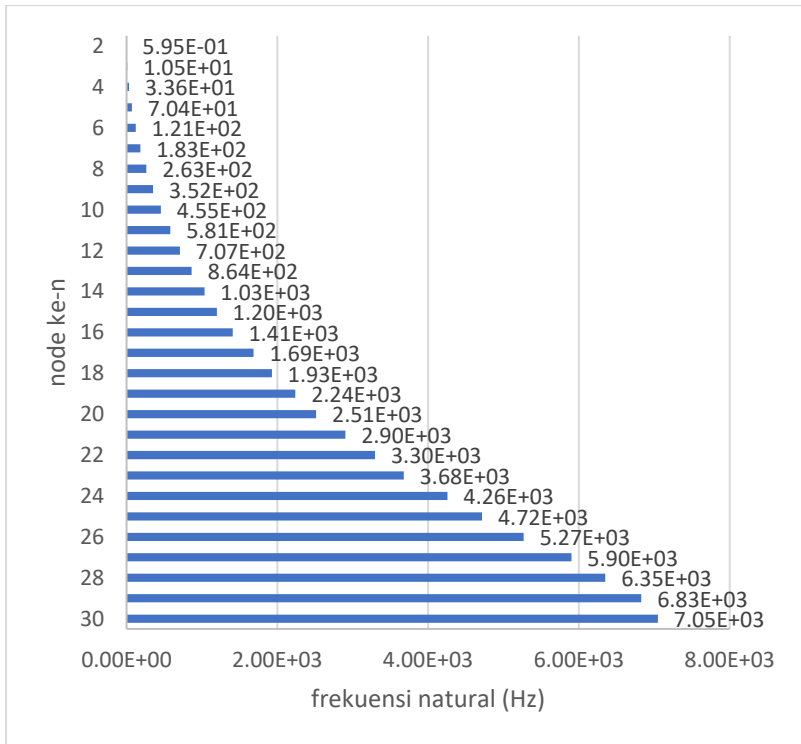
4.2.1. Frekuensi Natural

Frekuensi natural diperlukan untuk mengetahui kondisi frekuensi struktur tersebut. Perhitungan frekuensi natural kondisi *spudding in. Drill pipe* dengan grade S-135, G-10 dan Z-140 memiliki frekuensi natural sebagai berikut :



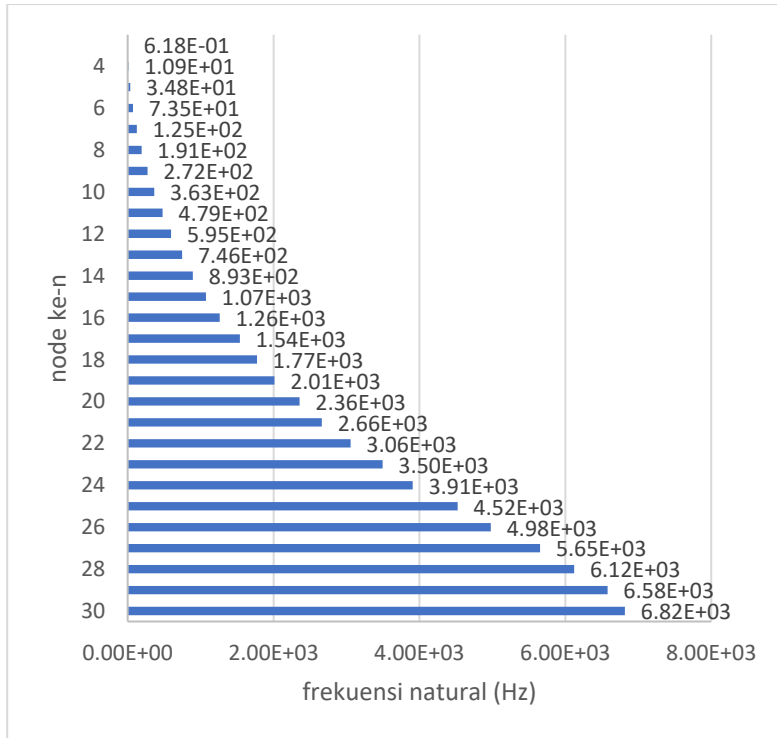
Gambar 4. 47 Frekuensi Natural *Drill Pipe* Grade S-135 dengan Variasi Panjang

Gambar 4.47 merupakan frekuensi natural dari *drill pipe* grade S-135, dari grafik tersebut *drill pipe* dengan grade S-135 memiliki frekuensi natural maksimal sebesar 4170 Hz pada node 20.



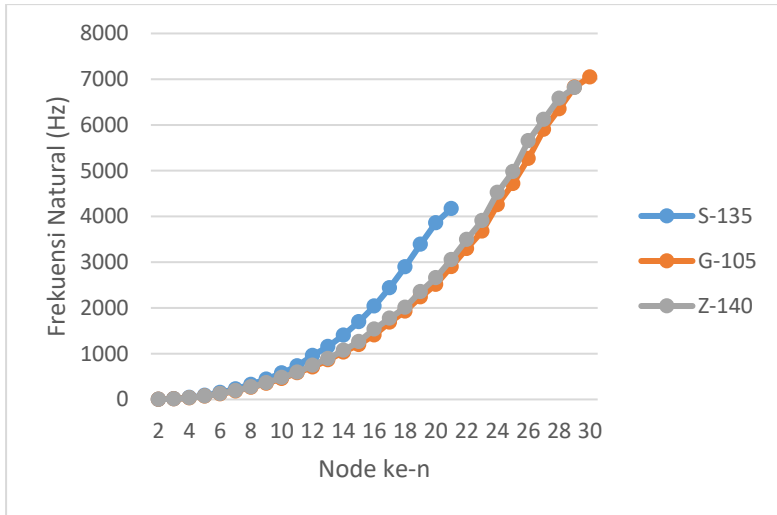
Gambar 4. 48 Frekuensi Natural *Drill Pipe* Grade G-105 dengan Variasi Panjang

Gambar 4.48 merupakan frekuensi natural dari *drill pipe* grade G-105, dari grafik tersebut *drill pipe* dengan grade G-105 memiliki frekuensi natural maksimal sebesar 7050 Hz pada node 20.



Gambar 4. 49 Frekuensi Natural *Drill Pipe* Grade Z-140 dengan Variasi Panjang

Gambar 4.49 merupakan frekuensi natural dari *drill pipe* grade Z-140, dari grafik tersebut *drill pipe* dengan grade Z-140 memiliki frekuensi natural maksimal sebesar 6820 Hz pada node 20.

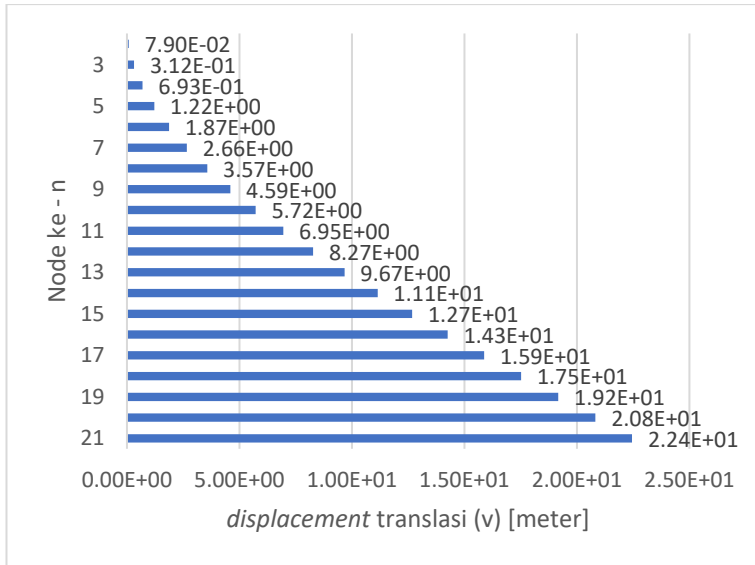


Gambar 4. 50 Perbandingan Frekuensi Natural *Drill Pipe* dengan Variasi Panjang

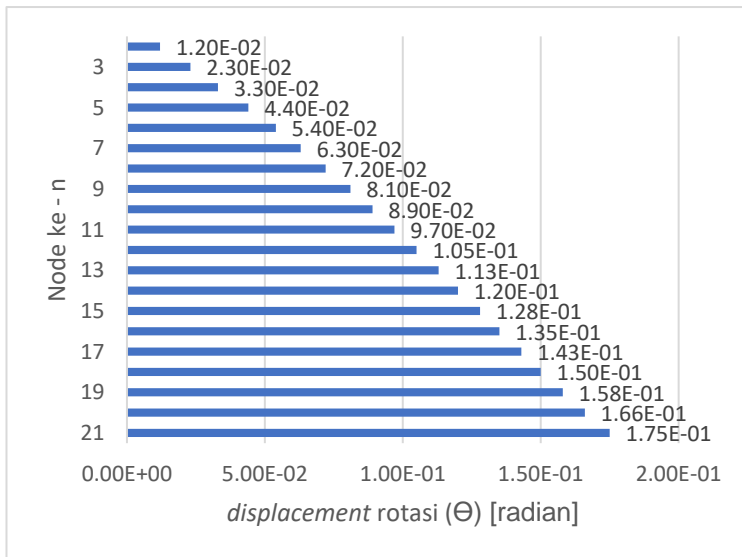
Pada Gambar 4.50 menunjukkan perbandingan frekuensi natural *drill pipe* dari masing-masing grade dengan diameter dalam dan diameter luar yang sama namun dengan panjang yang berbeda. *Drill pipe* dengan grade S-135 memiliki panjang 44,5 feet , *drill pipe* dengan grade G-105 memiliki panjang 31,5 feet, *drill pipe* dengan grade Z-140 memiliki panjang 32,2 feet. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa *drill pipe* dengan grade G-105 memiliki frekuensi natural yang lebih besar, sedangkan frekuensi natural yang terkecil dimiliki oleh *drill pipe* dengan grade S-135. Hasil ini memperlihatkan bahwa semakin panjang *drill pipe* maka semakin besar frekuensi naturalnya.

4.2.2. *Drill Pipe* dengan Grade S-135

Dilakukan perhitungan *displacement* menggunakan *Mathcad*. Hasil *displacement* saat *spudding in* dapat dilihat pada Gambar 4.51 untuk *displacement* translasi (v) dan Gambar 4.52 untuk *displacement* rotasi (Θ).



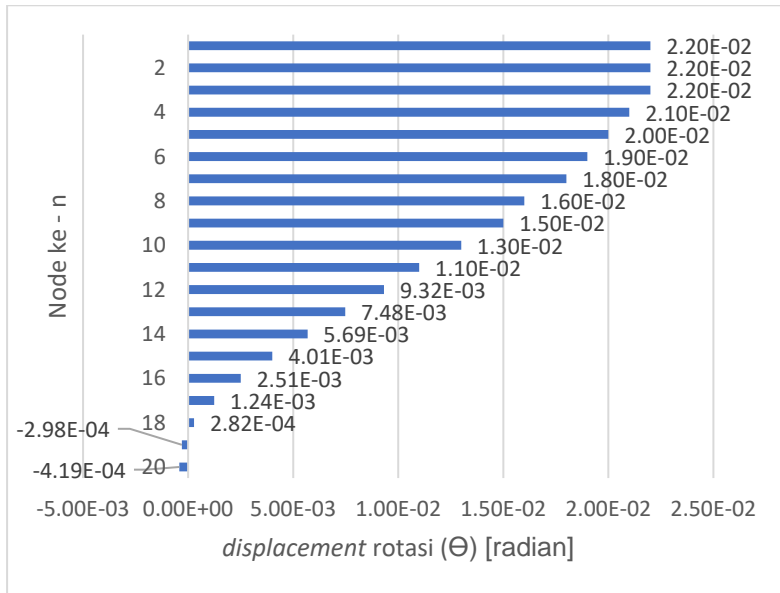
Gambar 4. 51 *Displacement Translasi Spudding In Grade S-135*



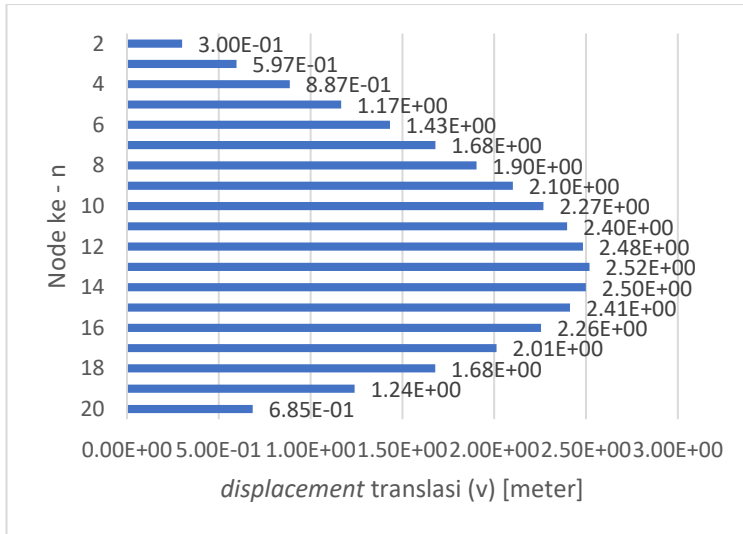
Gambar 4. 52 *Displacement Rotasi Spudding In Grade S-135*

Gambar 4.51 dan Gambar 4.52 merupakan merupakan *displacement* translasi dan rotasi *drill pipe* grade S-135 saat keadaan *spudding in*.

Kedua grafik tersebut menunjukkan bahwa semakin besar node *drill pipe* yang berarti semakin dalam *drill pipe* mencapai kedalaman di laut maka semakin besar *displacement* translasi dan *displacement* rotasinya. *Displacement* translasi pada node ke-2 dan node ke-21 sebesar 0,079 m dan 22,4 m. Sedangkan *displacement* rotasi pada node ke-2 dan node ke-21 sebesar 0,012 radian dan 0,175 radian.



Gambar 4. 53 *Displacement* Rotasi Drilling Grade S-135



Gambar 4. 54 *Displacement* Translasi *Drilling* Grade S-135

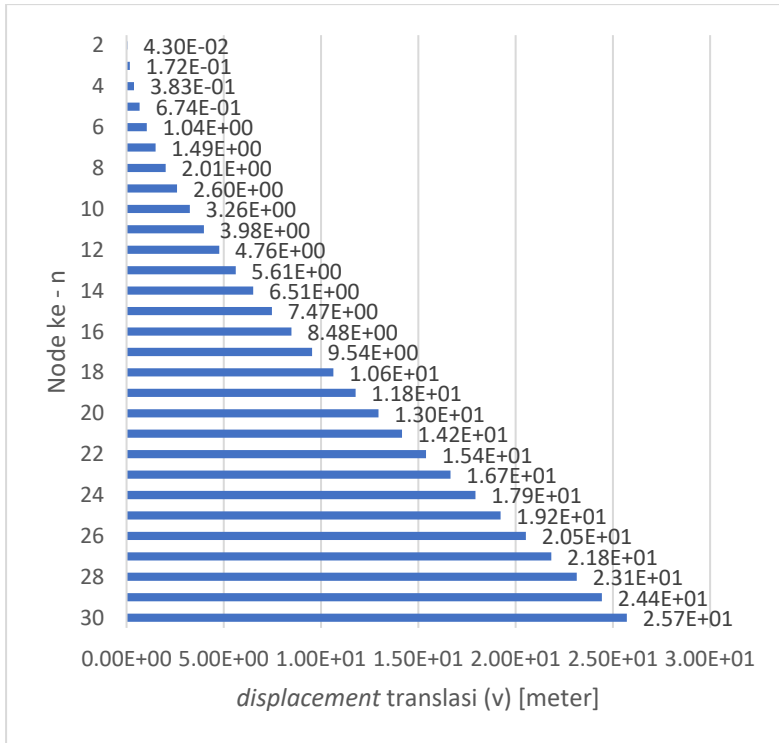
Gambar 4.53 dan Gambar 4.54 merupakan *displacement* rotasi dan translasi *drill pipe* grade S-135 saat keadaan *drilling*.

Gambar 4.53 menunjukkan bahwa semakin besar node *drill pipe* yang berarti semakin dalam *drill pipe* mencapai kedalaman di laut maka semakin kecil *displacement* rotasinya. *displacement* rotasi pada node ke-1 dan node ke-20 sebesar 0,022 m dan -0,000419 m.

Gambar 4.54 menunjukkan *displacement* translasi dari *drill pipe* grade S-135. *displacement* translasi terbesar berada pada node 13 dengan nilai 2,52 m.

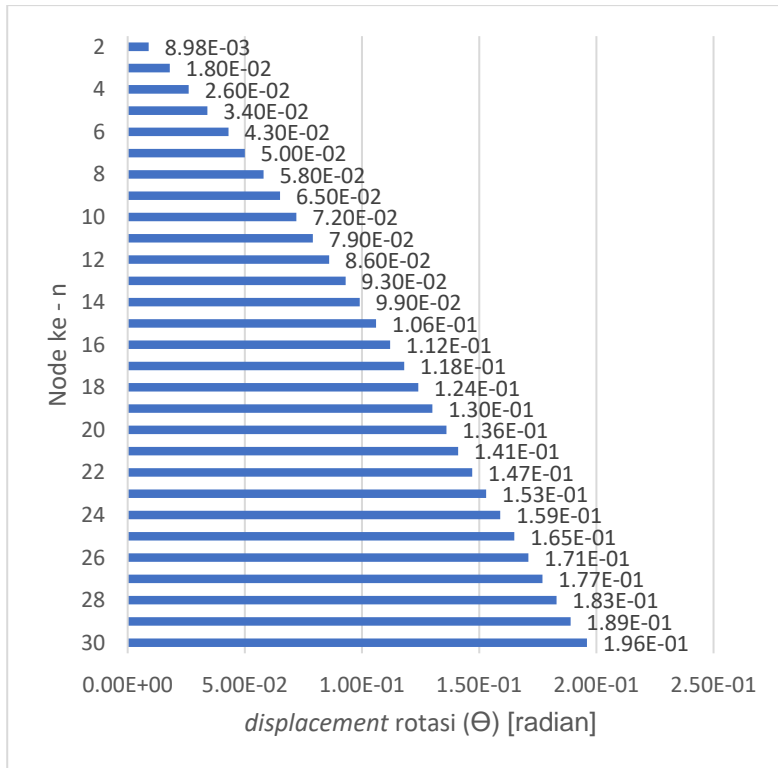
4.2.3. *Drill Pipe* dengan Grade G-105

Drill Pipe dengan Grade G-105 memiliki *displacement* translasi (v) dan *displacement* rotasi (Θ) yang dapat dilihat pada Gambar 4.55 dan Gambar 4.56



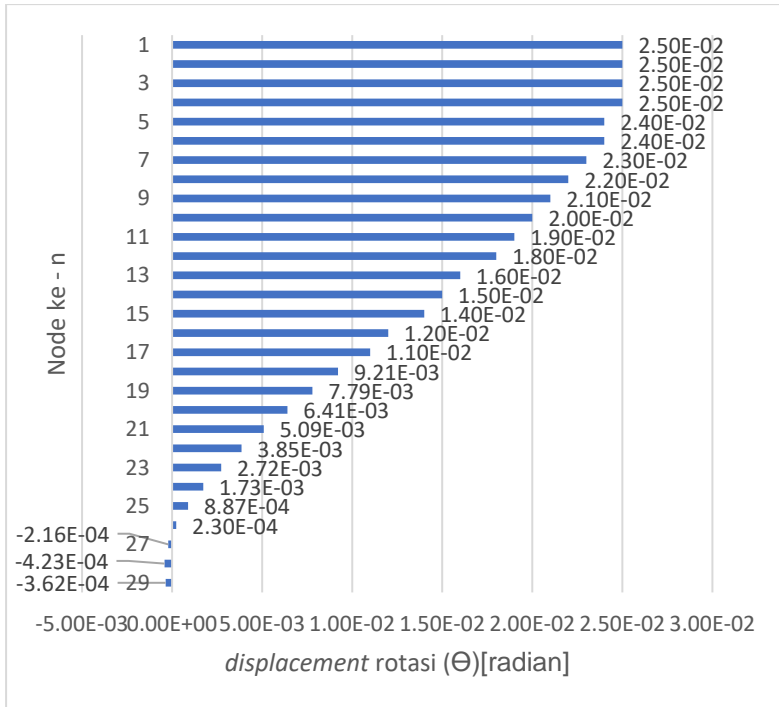
Gambar 4. 55 *Displacement Translasi Spudding In Grade G-105*

Gambar 4.55 merupakan *displacement* translasi *drill pipe* grade G-105 saat keadaan *spudding in*. Grafik tersebut menunjukkan bahwa semakin besar node *drill pipe* yang berarti semakin dalam *drill pipe* mencapai kedalaman di laut maka semakin besar *displacement* translasi dan *displacement* rotasinya. *displacement* translasi pada node ke-2 dan node ke-30 sebesar 0,043 m dan 25,7 m.



Gambar 4. 56 *Displacement Rotasi Spudding In Grade G-105*

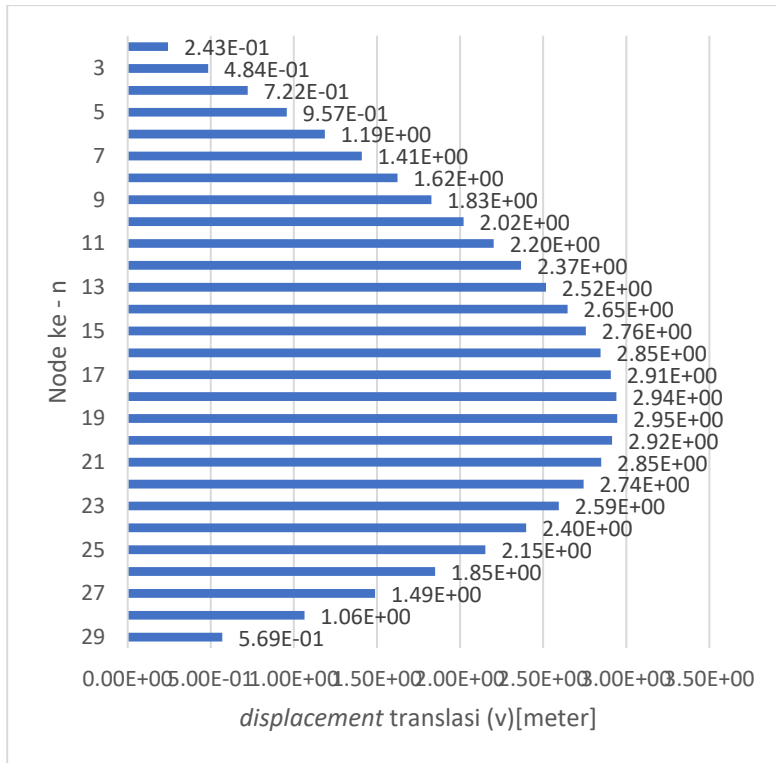
Gambar 4.56 merupakan *displacement* rotasi *drill pipe* grade G-105 saat keadaan *spudding in*. Grafik tersebut menunjukkan bahwa semakin besar node *drill pipe* yang berarti semakin dalam dalam *drill pipe* mencapai kedalaman di laut maka semakin besar *displacement* translasi dan *displacement* rotasinya. *Displacement* rotasi pada node ke-2 dan node ke-30 sebesar 0,00898 radian dan 0,196 radian.



Gambar 4. 57 *Displacement Rotasi Drilling Grade G-105*

Gambar 4.57 merupakan *displacement* rotasi *drill pipe* grade G-105 saat keadaan *drilling*. Berdasarkan variasi Panjang *drill pipe*, untuk mencapai kedalaman 270 meter *drill pipe* dengan grade G-105 harus disambung sebanyak 29 sambungan, sehingga membutuhkan 29 elemen.

Dari grafik tersebut menunjukkan bahwa semakin besar node *drill pipe* yang berarti semakin dalam *drill pipe* mencapai kedalaman di laut maka semakin kecil *displacement* rotasinya. *displacement* rotasi pada node ke-1 dan node ke-29 sebesar 0,025 radian dan -0,000362 radian.



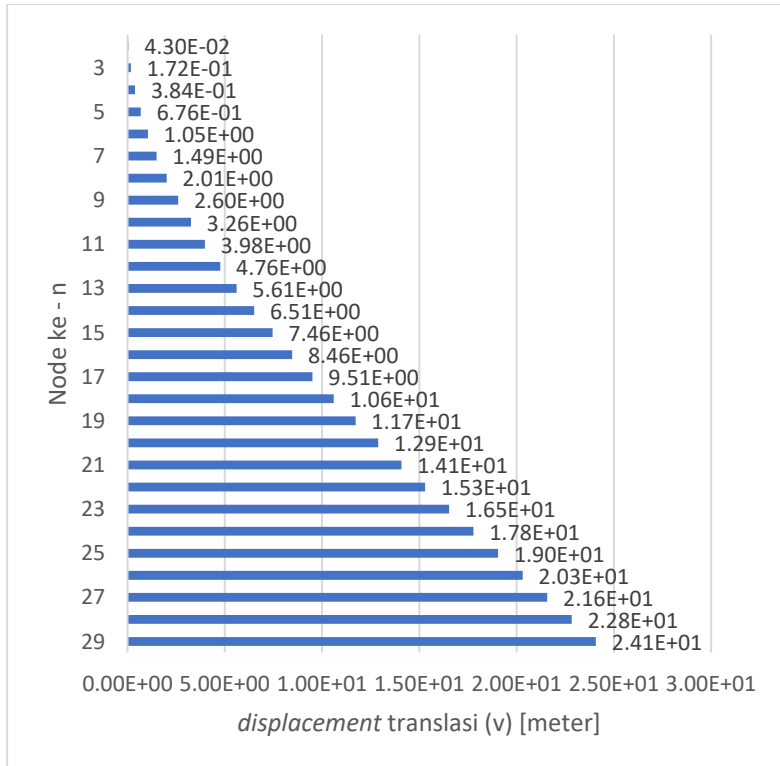
Gambar 4. 58 *Displacement Translasi Drilling Grade G-105*

Gambar 4.58 merupakan *displacement* translasi *drill pipe* grade G-105 saat keadaan *drilling*.

Dari grafik tersebut menunjukkan bahwa simpangan *drill pipe* dari mulai node 2 sampai node 19 membesar, namun dari node 20 sampai node 29 simpangannya mengecil. Untuk nilai *displacement* translasi pada node ke-2 dan node ke-29 sebesar 0,243 m dan 0,569 m. Nilai *displacement* atau perpindahan translasi terbesar yaitu pada node 19 sebesar 2,95 m.

4.2.4. Drill Pipe dengan Grade Z-140

Drill Pipe dengan Grade Z-140 memiliki *displacement* translasi (v) dan *displacement* rotasi (Θ) yang dapat dilihat pada Gambar 4.59 dan Gambar 4.60

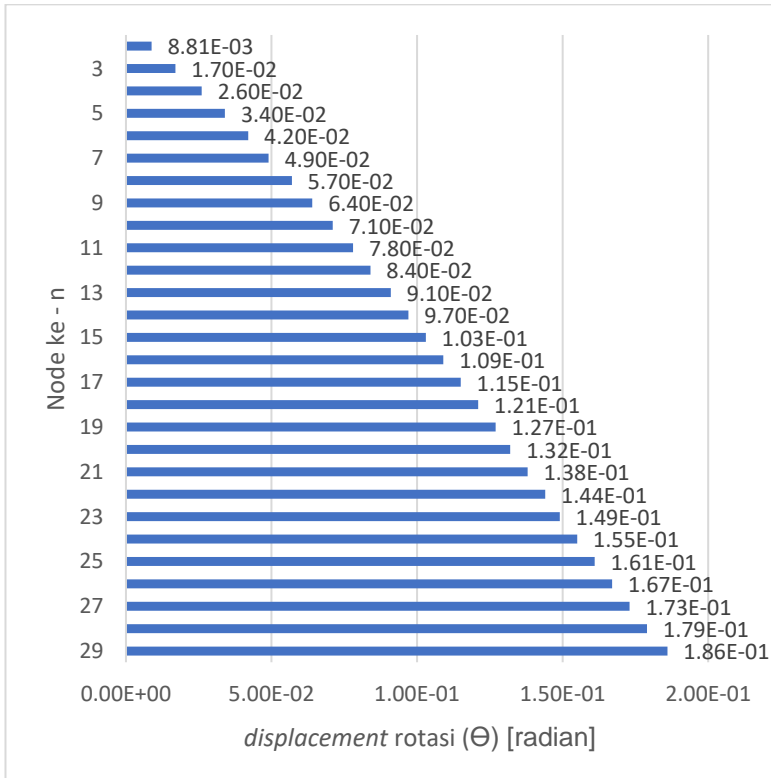


Gambar 4. 59 *Displacement* Translasi *Spudding In* Grade Z-140

Gambar 4.59 merupakan *displacement* translasi *drill pipe* grade Z-140 berdasarkan variasi panjang saat keadaan *spudding in*. Berdasarkan variasi panjang, untuk mencapai kedalaman 270 meter, *drill pipe* dengan grade Z-140 harus disambung sebanyak 28 sambungan, sehingga membutuhkan 28 elemen.

Dari grafik tersebut menunjukkan bahwa semakin besar node *drill pipe* yang berarti semakin dalam *drill pipe* mencapai

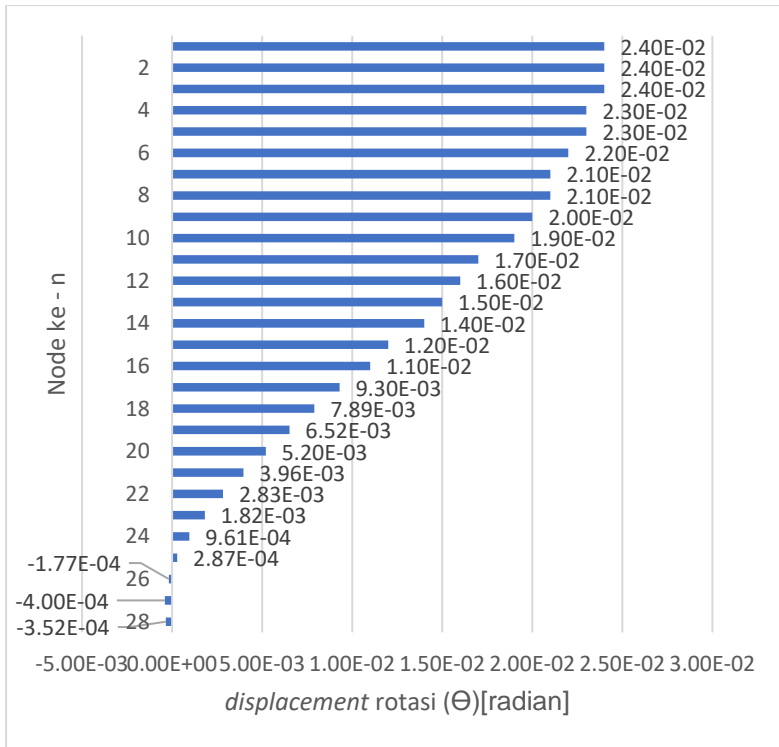
kedalaman di laut maka semakin besar *displacement* translasinya. *displacement* translasi pada node ke-2 dan node ke-29 sebesar 0,043 m dan 24,1 m.



Gambar 4. 60 *Displacement Rotasi Spudding In Grade Z-140*

Gambar 4.60 merupakan *displacement* rotasi *drill pipe* saat keadaan *spudding in* dengan grade Z-140.

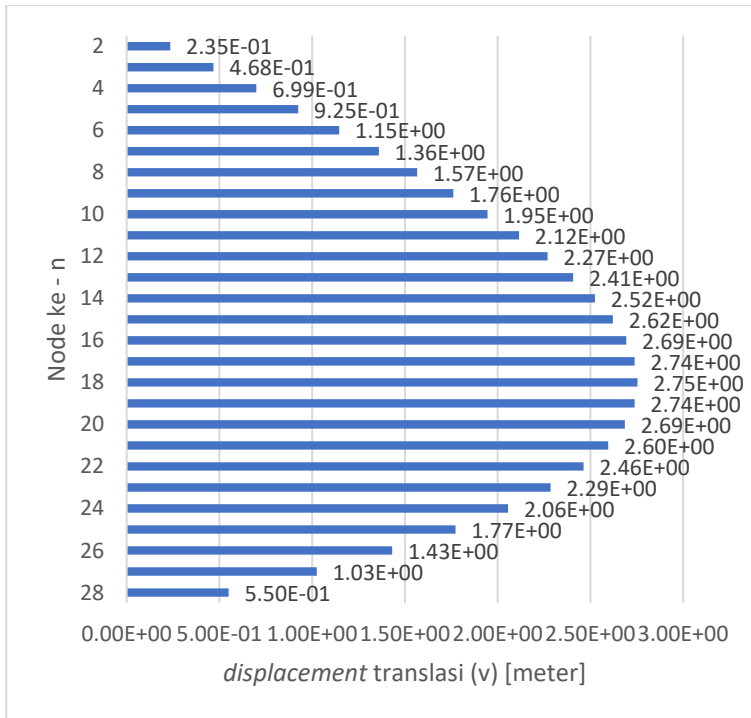
Dari grafik tersebut menunjukkan bahwa semakin besar node *drill pipe* yang berarti semakin dalam *drill pipe* mencapai kedalaman di laut maka semakin besar *displacement* rotasinya. *displacement* rotasi pada node ke-2 dan node ke-29 sebesar 0,00881 radian dan 0,186 radian.



Gambar 4. 61 *Displacement Rotasi Drilling Grade Z-140*

Gambar 4.61 merupakan *displacement rotasi drill pipe* saat keadaan *drilling* dengan grade Z-140.

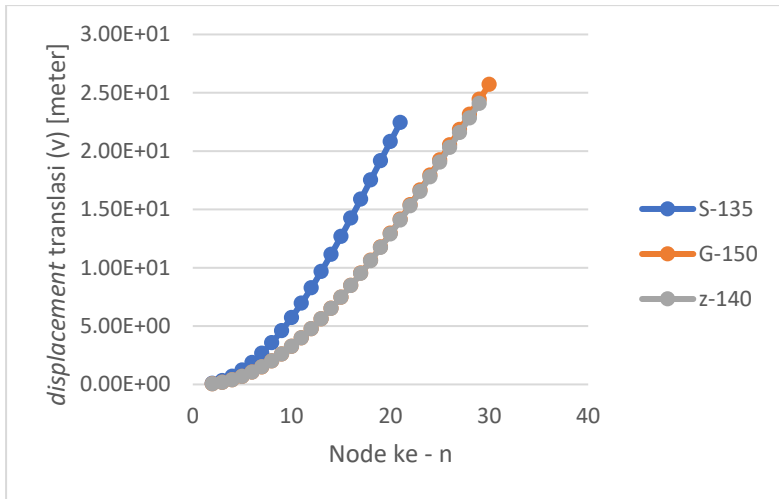
Dari grafik tersebut menunjukkan bahwa semakin besar node *drill pipe* yang berarti semakin dalam *drill pipe* mencapai kedalaman di laut maka semakin kecil *displacement* rotasinya. *displacement* rotasi pada node ke-1 dan node ke-28 sebesar 0,024 radian dan -0,000352 radian



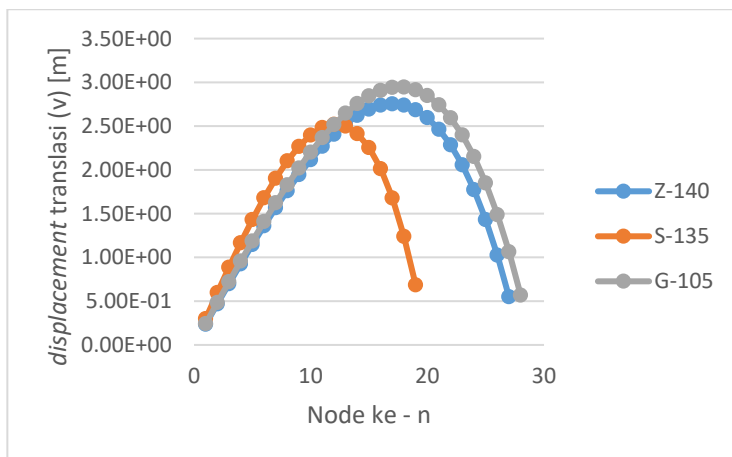
Gambar 4. 62 *Displacement Translasi Drilling Grade Z-140*

Gambar 4.62 merupakan perpindahan translasi *drill pipe* saat keadaan *drilling* dengan grade Z-140.

Dari grafik tersebut menunjukkan bahwa simpangan *drill pipe* dari mulai node 2 sampai node 18 membesar, namun dari node 18 sampai node 28 simpangannya mengecil. Untuk nilai perpindahan translasi pada node ke-2 dan node ke-28 sebesar 0,235 m dan 0,55 m. Nilai *displacement* atau perpindahan translasi terbesar yaitu pada node 18 sebesar 2,75 m.



Gambar 4. 63 Perbandingan *Displacement Translasi Spudding In Variasi Panjang*

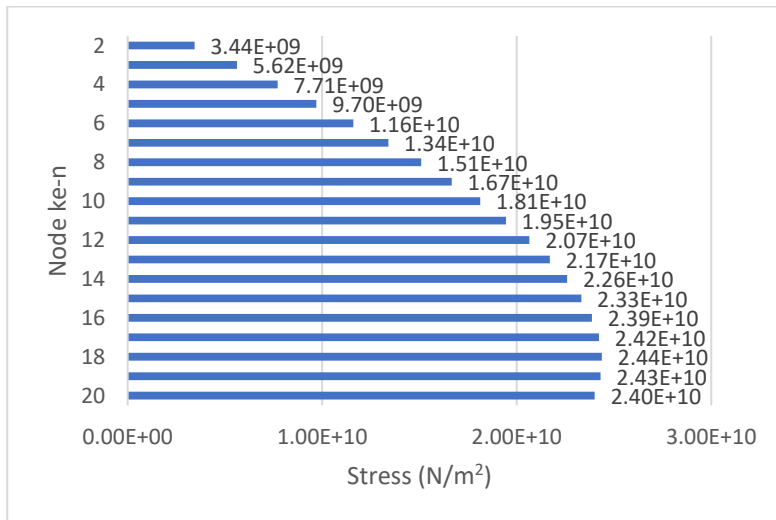


Gambar 4. 64 Perbandingan *Displacement Translasi Drilling Variasi Panjang*

Gambar 4.63 dan gambar 4.64 menunjukkan perbandingan perpindahan translasi *drill pipe* berdasarkan variasi diameter saat *spudding in* dan *drilling* untuk mencapai kedalaman 270 meter. Dari kedua grafik tersebut, perpindahan translasi terkecil dimiliki oleh *drill pipe* dengan grade S-135 untuk *drilling* dan *spudding in* dengan nilai perpindahan translasi saat *spudding in* dan *drilling* sebesar 22,4 m pada node 21 dan 2,52 m pada node 13.

4.2.5. Stress-Strain dengan Grade S-135

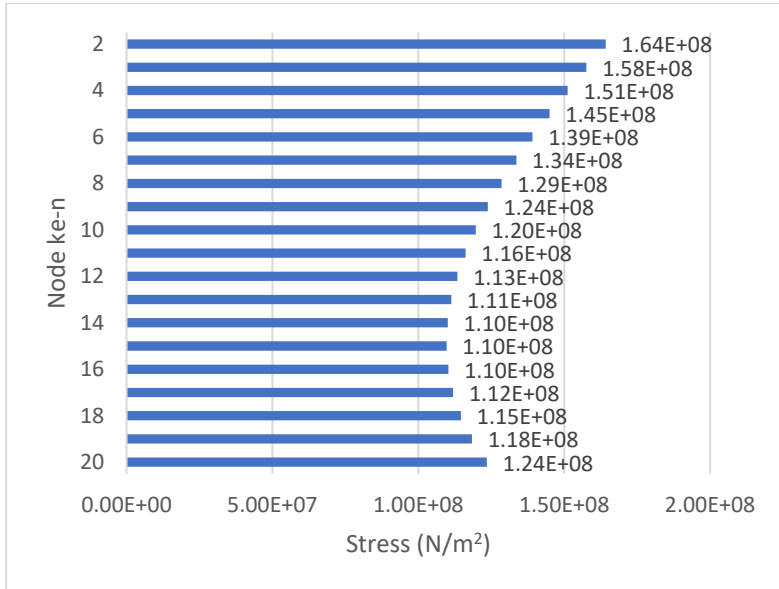
Dilakukan perhitungan *stress-strain* pada setiap sambungan *drill pipe* dengan menggunakan Mathcad. *Stress* pada sambungan *drill pipe* dengan grade S-135 variasi panjang dapat dilihat pada Gambar 4.65 untuk *stress* translasi, dan Gambar 4.66 untuk *stress* rotasi (puntir)



Gambar 4. 65 Stress Translasi Drill Pipe Grade S-135 saat *Spudding In*

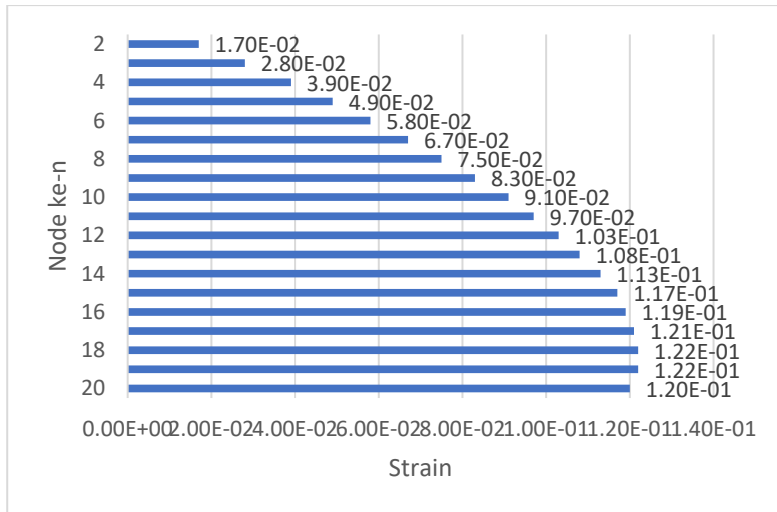
Gambar 4.65 menunjukkan bahwa *stress* translasi pada setiap sambungan *drill pipe* saat keadaan *spudding in* nilainya semakin besar dengan bertambahnya kedalaman air laut, ini terjadi karena

pengaruh tekanan air laut yang semakin kedalam semakin besar tekanannya, sehingga gaya yang mengenai *drill pipe* semakin kedalam semakin besar. *Stress* translasi pada node ke-2 dan node ke-20 sebesar $3,44 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ dan $2,40 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$.

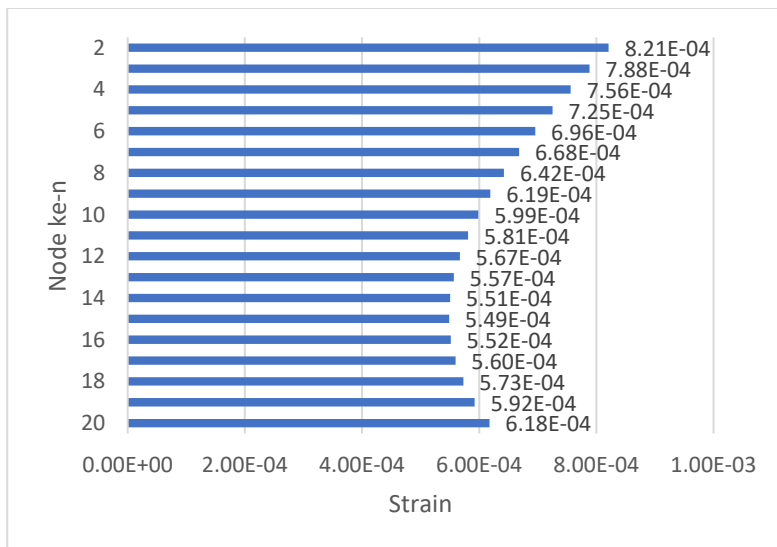


Gambar 4. 66 *Stress Rotasi Drill Pipe Grade S-135 saat Spudding In*

Dari Gambar 4.66 menunjukkan bahwa *stress* rotasi pada setiap sambungan *drill pipe* saat keadaan *spudding in*. dimana saat keadaan ini *stress* rotasi maksimum berada pada node 2 yaitu $1,64 \times 10^8 \text{ N/m}^2$.

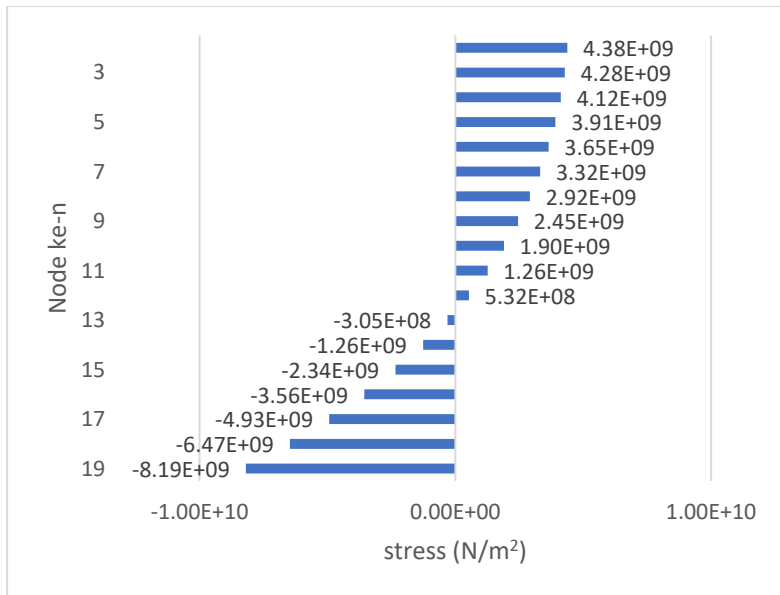


Gambar 4. 67 Strain Translasi Drill Pipe Grade S-135 saat Spudding In



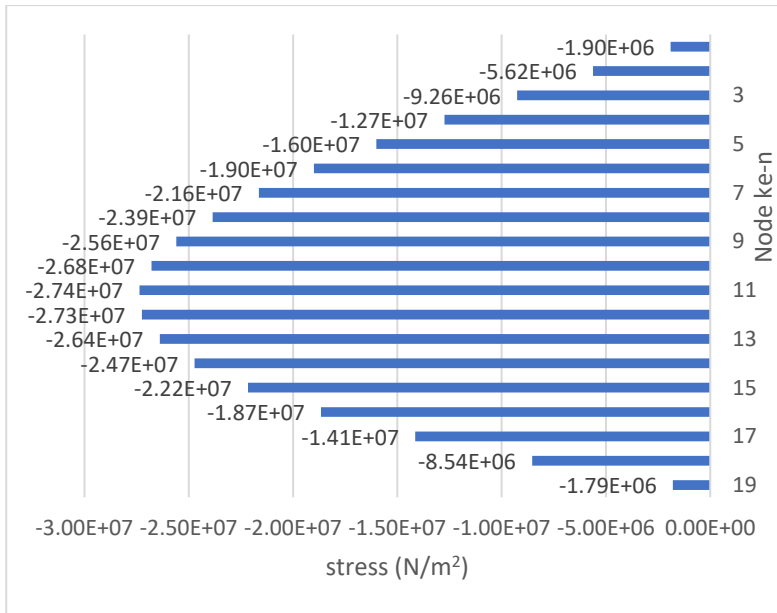
Gambar 4. 68 Strain Rotasi Drill Pipe Grade S-135 saat Spudding In

Gambar 4.67 dan Gambar 4.68 merupakan *strain* pada sambungan *drill pipe* saat keadaan *spudding in*. Gambar 4.67 tersebut menunjukkan bahwa *strain drill pipe* saat keadaan *spudding in* semakin kebawah semakin besar, dimana nilai *strain* translasi dari node teratas (node 2) dan node terbawah (node 21) memiliki nilai sebesar 0,017 dan 0,120 dan *strain* rotasi *drill pipe* pada node 2 dan 20 mempunyai nilai 0,000821 dan 0,000618.



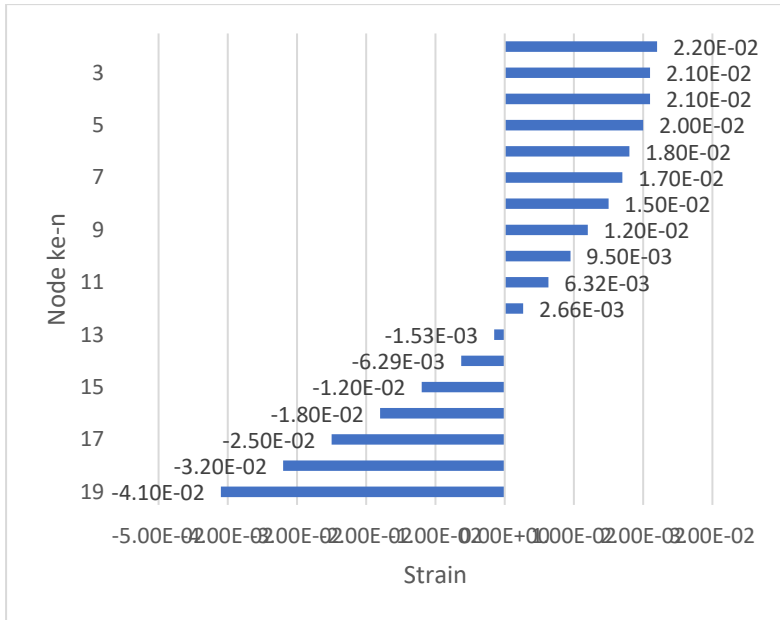
Gambar 4. 69 *Stress Translasi Drill Pipe Grade S-135 saat Drilling*

Gambar 4.69 merupakan *stress* translasi *drill pipe* dengan grade S-135 saat keadaan *drilling*. Nilai *stress* translasi maksimum berada pada node 19 dengan nilai $-8,19 \times 10^9 \text{ N/m}^2$.



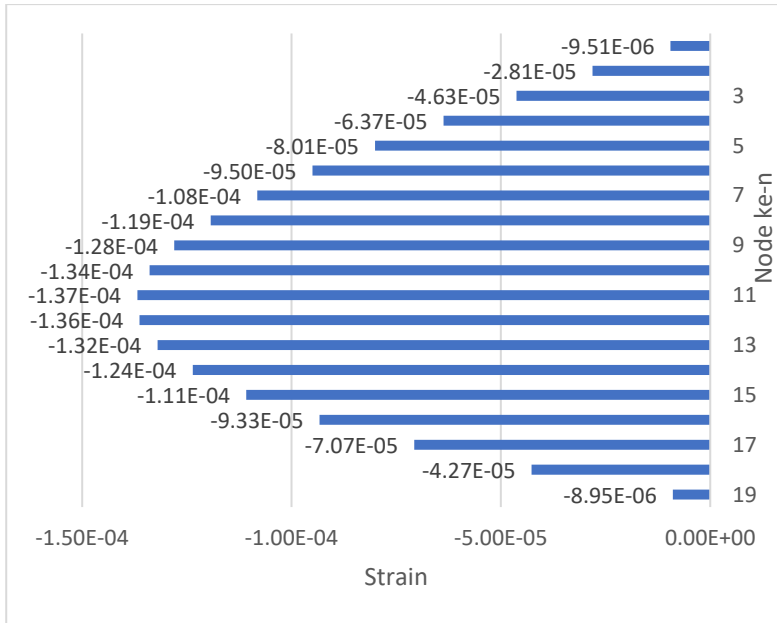
Gambar 4. 70 *Stress Rotasi Drill Pipe Grade S-135 saat Drilling*

Gambar 4.70 merupakan *stress* rotasi *drill pipe* dengan grade S-135 saat keadaan *drilling*. Dari gambar tersebut menunjukkan bahwa *stress* rotasi *drill pipe* semakin kebawah semakin membesar dengan nilai *stress* terkecil berada pada node ke-1 yaitu $-1,90 \times 10^6$ N/m² dan *stress* terbesar berada pada node ke-11 yaitu $-2,74 \times 10^7$ N/m².



Gambar 4. 71 *Strain Translasi Drill Pipe Grade S-135 saat Drilling*

Gambar 4.71 merupakan *strain* translasi *drill pipe* dengan grade S-135 saat keadaan *drilling*. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa nilai *strain* translasi maksimum berada pada node 19 dengan nilai -0,041

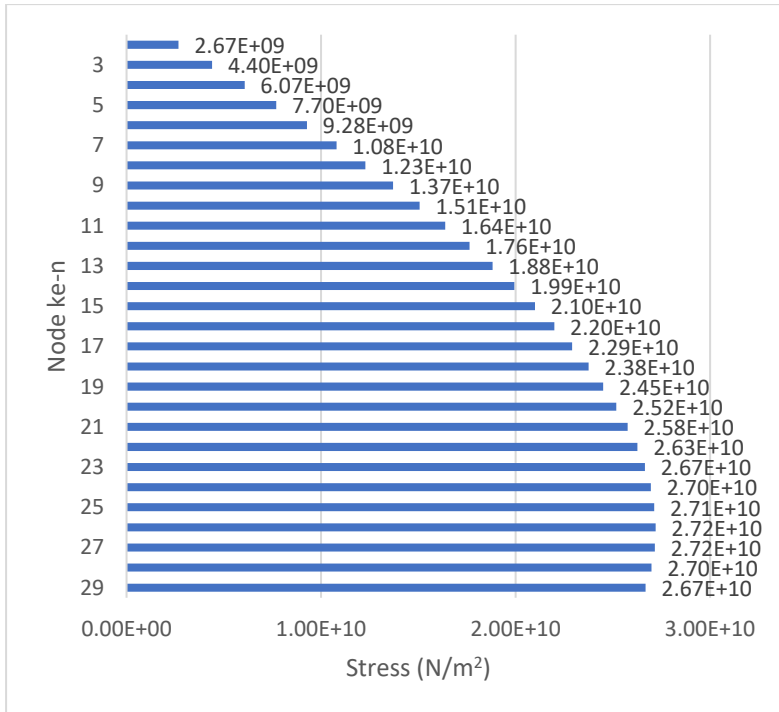


Gambar 4. 72 *Strain Rotasi Drill Pipe Grade S-135 saat Drilling*

Gambar 4.72 merupakan *strain* rotasi *drill pipe* dengan grade S-135 saat keadaan *drilling*. Dari grafik tersebut menunjukkan bahwa *strain* rotasi *drill pipe* semakin kebawah semakin membesar, *strain* rotasi terbesar berada pada node 11 dengan nilai -0,000137 sedangkan nilai *strain* rotasi terkecil berada pada node ke-1 dengan nilai -0,00000951.

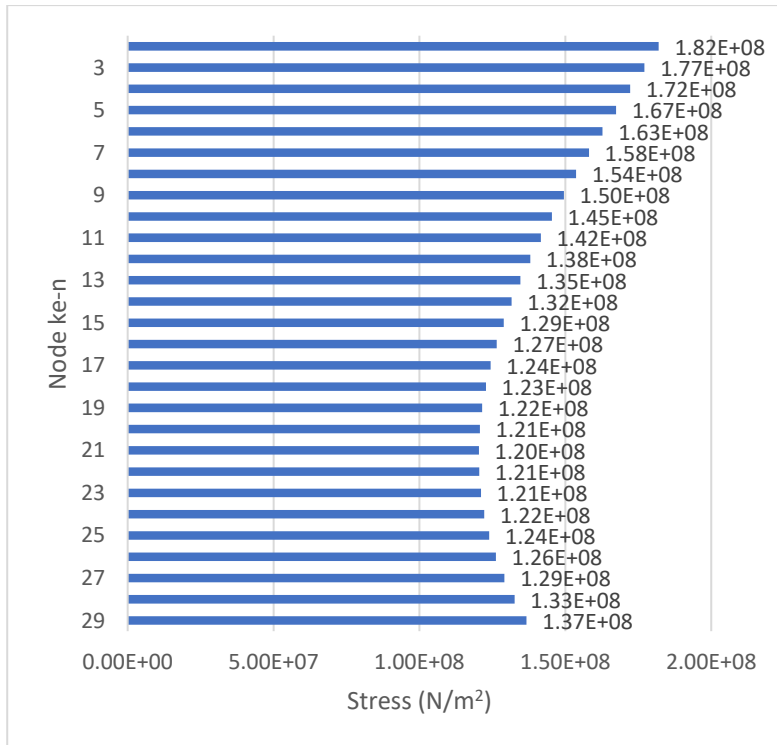
4.2.6. *Stress-Strain dengan Grade G-105*

Dilakukan perhitungan *stress-strain* pada setiap sambungan *drill pipe* dengan menggunakan Mathcad. *Stress* pada sambungan *drill pipe* dengan grade G-105 variasi panjang dapat dilihat pada Gambar 4.73 untuk *stress* translasi, dan Gambar 4.74 untuk *stress* rotasi (puntir)



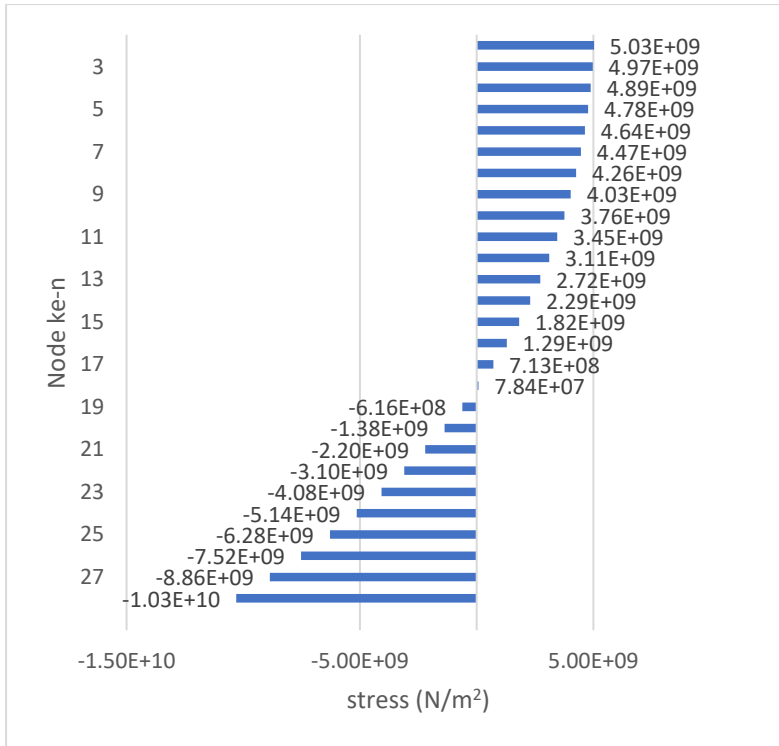
Gambar 4. 73 *Stress Translasi Drill Pipe Grade G-105 saat Spudding In*

Gambar 4.73 menunjukkan bahwa *stress* translasi pada setiap sambungan *drill pipe* saat keadaan *spudding in* nilainya semakin besar dengan bertambahnya kedalaman air laut, ini terjadi karena pengaruh tekanan air laut yang semakin kedalam semakin besar tekanannya, sehingga gaya yang mengenai *drill pipe* semakin kedalam semakin besar. *Stress* translasi pada node ke-2 dan node ke-29 sebesar $2,67 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ dan $2,67 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$.



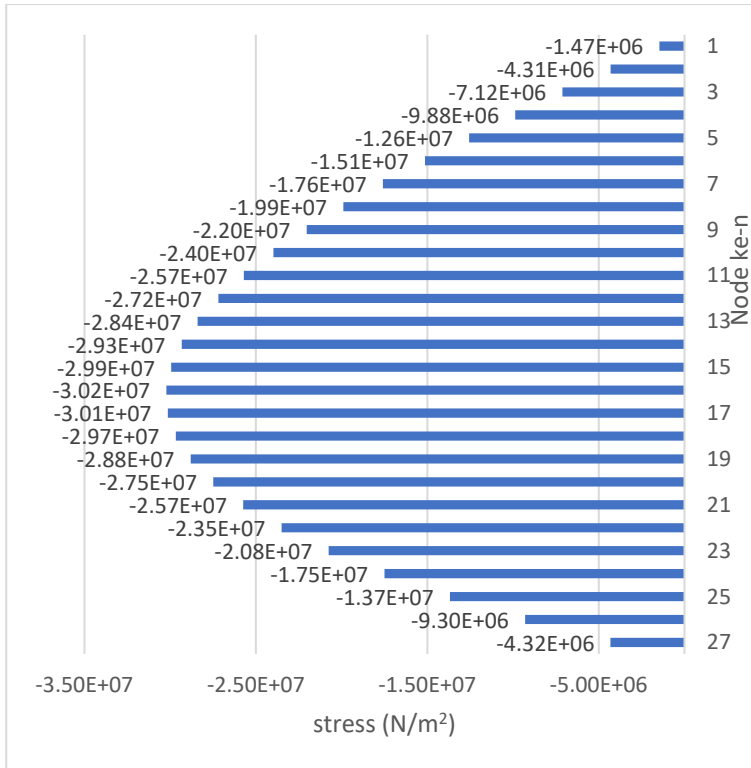
Gambar 4. 74 *Stress Rotasi Drill Pipe Grade G-105 saat Spudding In*

Dari Gambar 4.74 menunjukkan bahwa *stress* rotasi maksimum pada *drill pipe* saat keadaan *spudding in* berada pada node 2 dengan nilai $1,82 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ dan *stress* rotasi minimum berada pada node 21 yaitu $1,20 \times 10^8 \text{ N/m}^2$.



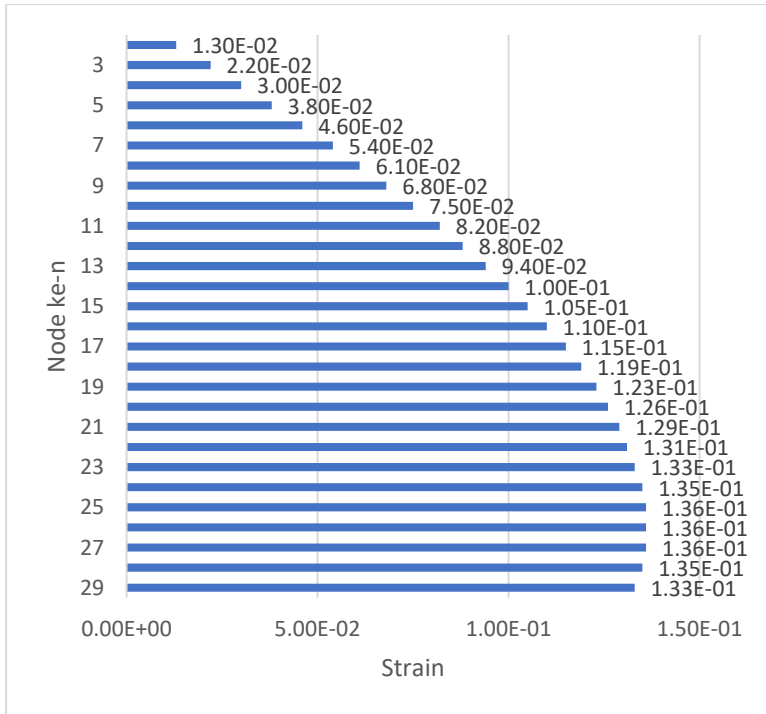
Gambar 4. 75 *Stress Translasi Drill Pipe Grade G-105 saat Drilling*

Gambar 4.75 merupakan *stress* rotasi *drill* pipe dengan grade S-135 saat keadaan *drilling*. Dari garfik tersebut dapat dilihat bahwa nilai *strss* translasi maksimum saat *drilling* berada pada node 28 dengan nilai $-1,03 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$.



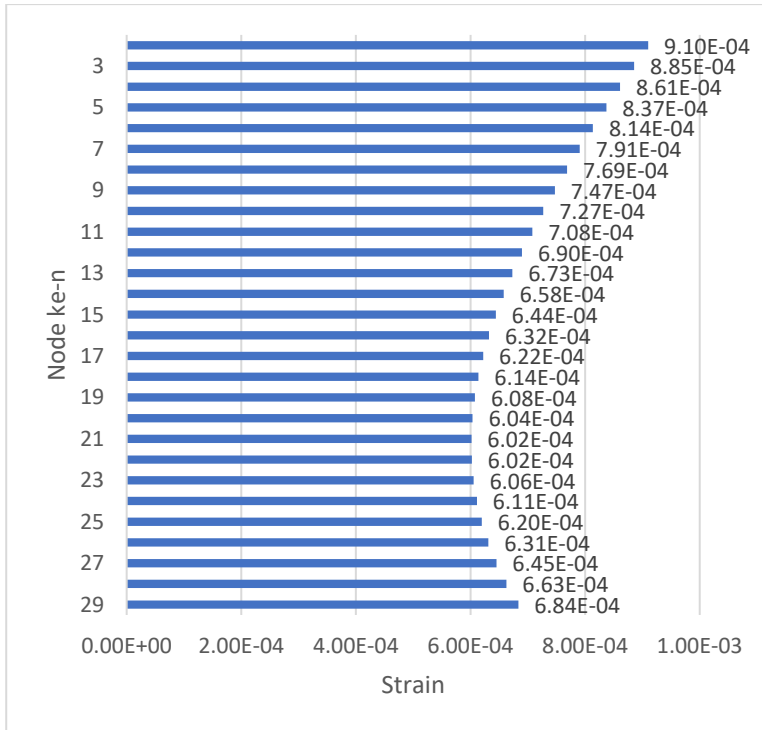
Gambar 4. 76 *Stress Rotasi Drill Pipe Grade G-105 saat Drilling*

Gambar 4.76 merupakan *stress* rotasi pada sambungan *drill pipe* G-105 saat keadaan *drilling*. Grafik tersebut menunjukkan bahwa *stress drill pipe* saat keadaan *drilling* semakin kebawah semakin besar, dimana nilai *stress* rotasi dari node teratas (node 1) dan node terbawah (node 28) memiliki nilai sebesar $-1,47 \times 10^6$ N/m² dan $-4,32 \times 10^6$ N/m². Nilai terbesar berada pada node 16 sebesar $-3,02 \times 10^7$ N/m².



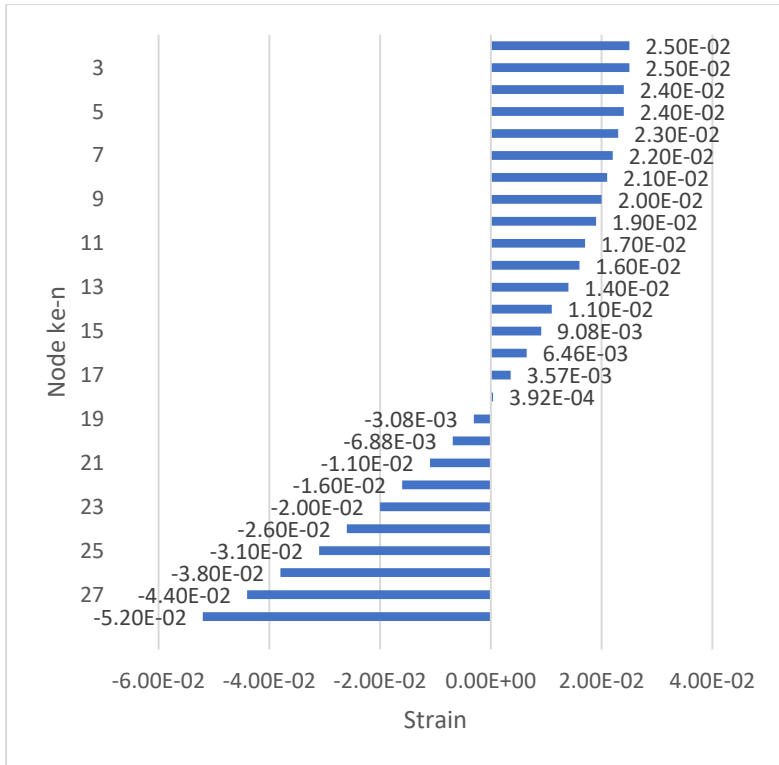
Gambar 4. 77 *Strain Translasi Drill Pipe Grade G-105 saat Spudding In*

Gambar 4.77 merupakan *strain* translasi pada sambungan *drill pipe* grade G-105 saat keadaan *spudding in*. Grafik tersebut menunjukkan bahwa *strain drill pipe* saat keadaan *spudding in* semakin kebawah semakin besar, dimana nilai *strain* translasi dari node teratas (node 2) dan node terbawah (node 29) memiliki nilai sebesar 0,013 dan 0,133.



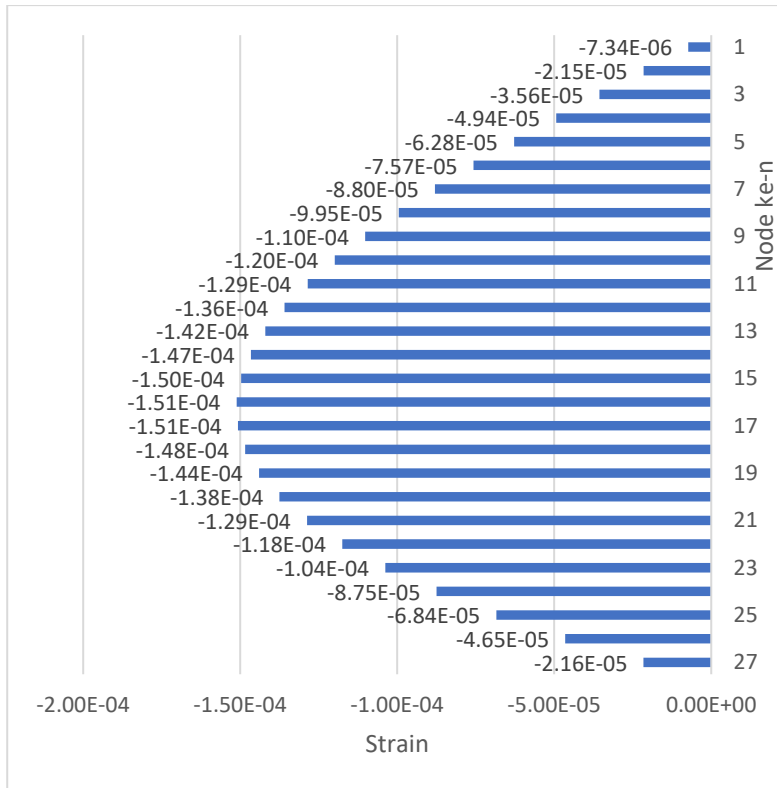
Gambar 4. 78 *Strain Rotasi Drill Pipe Grade G-105 saat Spudding In*

Gambar 4.78 merupakan *strain* rotasi pada sambungan *drill pipe* grade G-105 saat keadaan *spudding in*. Nilai *strain* rotasi maksimum saat *spudding in* berada pada node 2 dengan nilai 0,00091



Gambar 4. 79 *Strain Translasi Drill Pipe Grade G-105 saat Drilling*

Gambar 4.79 merupakan grafik *strain* translasi *drill* pipe dengan grade G-105 saat keadaan *drilling*. Nilai *strain* translasi maksimum pada *drill* pipe dengan grade G-105 berada pada node 28 dengan nilai -0,052



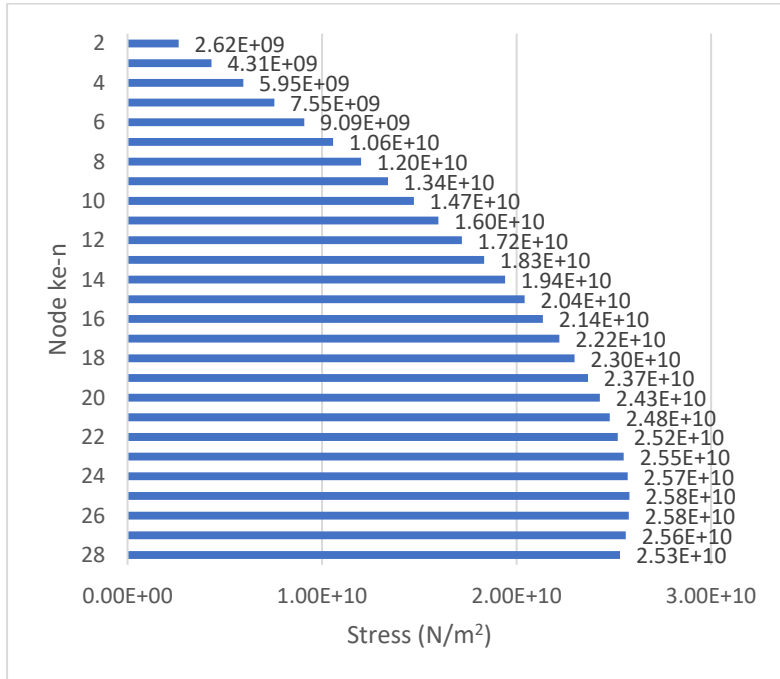
Gambar 4. 80 *Strain Rotasi Drill Pipe Grade G-105 saat Drilling*

Gambar 4.80 merupakan grafik *strain* rotasi *drill pipe* dengan grade G-105 saat keadaan *drilling*. Dari grafik tersebut menunjukkan bahwa *strain* rotasi *drill pipe* semakin kebawah semakin membesar, dengan nilai *strain* rotasi terbesar berada pada node 16 dan 17 dengan nilai -0,000151 sedangkan nilai *strain* translasi terkecil berada pada node ke-1 dengan nilai -0,00000734.

4.2.7. *Stress-Strain* dengan Grade Z-140

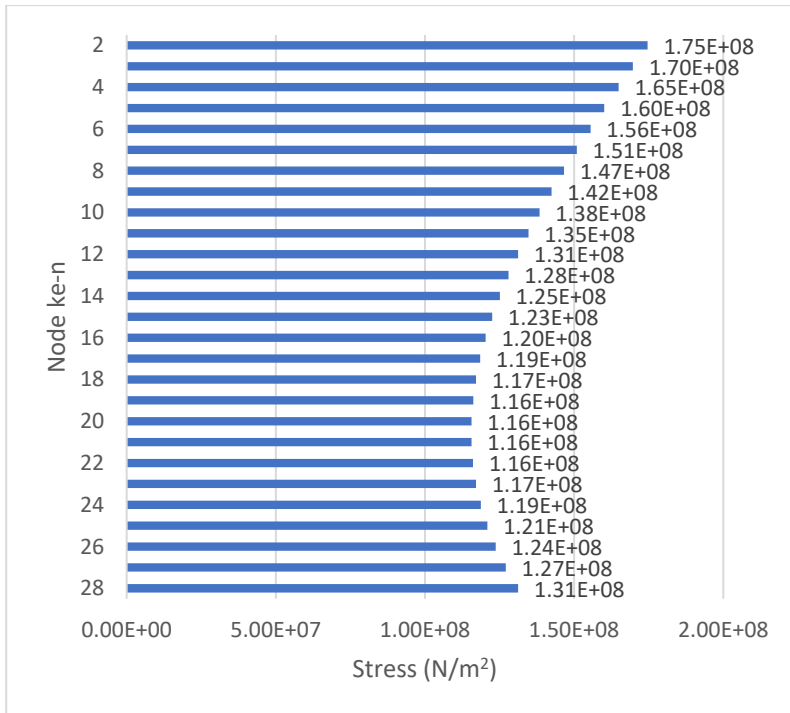
Dilakukan perhitungan *stress-strain* pada setiap sambungan *drill pipe* dengan menggunakan Mathcad. *Stress* pada sambungan *drill pipe* dengan grade Z-140 variasi panjang dapat dilihat pada

Gambar 4.81 untuk *stress* translasi, dan Gambar 4.82 untuk *stress* rotasi (puntir)



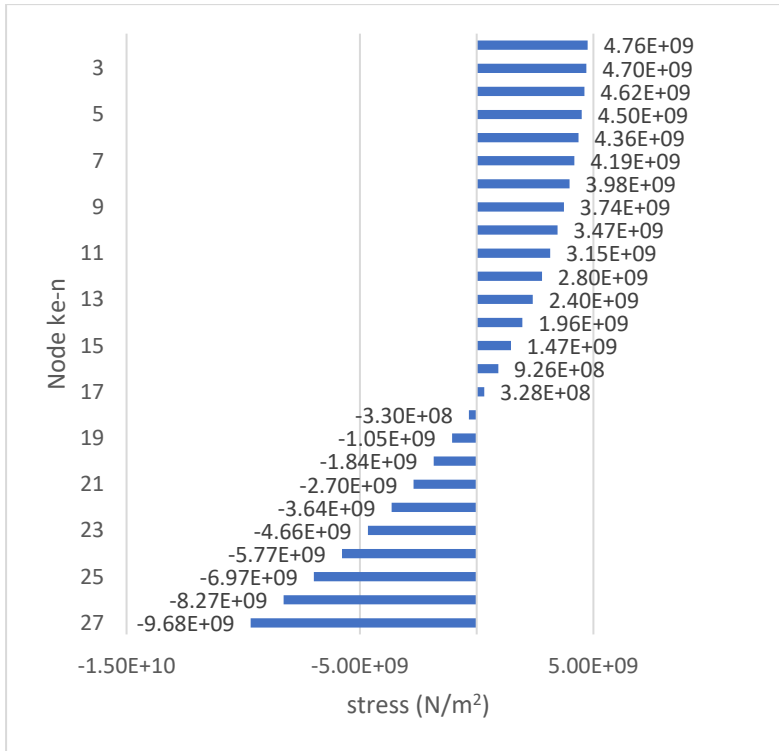
Gambar 4. 81 *Stress* Translasi *Drill Pipe* Grade Z-140 saat *Spudding In*

Gambar 4.81 menunjukkan bahwa *stress* translasi pada setiap sambungan *drill pipe* saat keadaan *spudding in* nilainya semakin besar dengan bertambahnya kedalaman air laut, ini terjadi karena pengaruh tekanan air laut yang semakin kedalaman semakin besar tekanannya, sehingga gaya yang mengenai *drill pipe* semakin kedalaman semakin besar. *Stress* translasi pada node ke-2 dan node ke-28 sebesar $2,62 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ dan $2,53 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$.



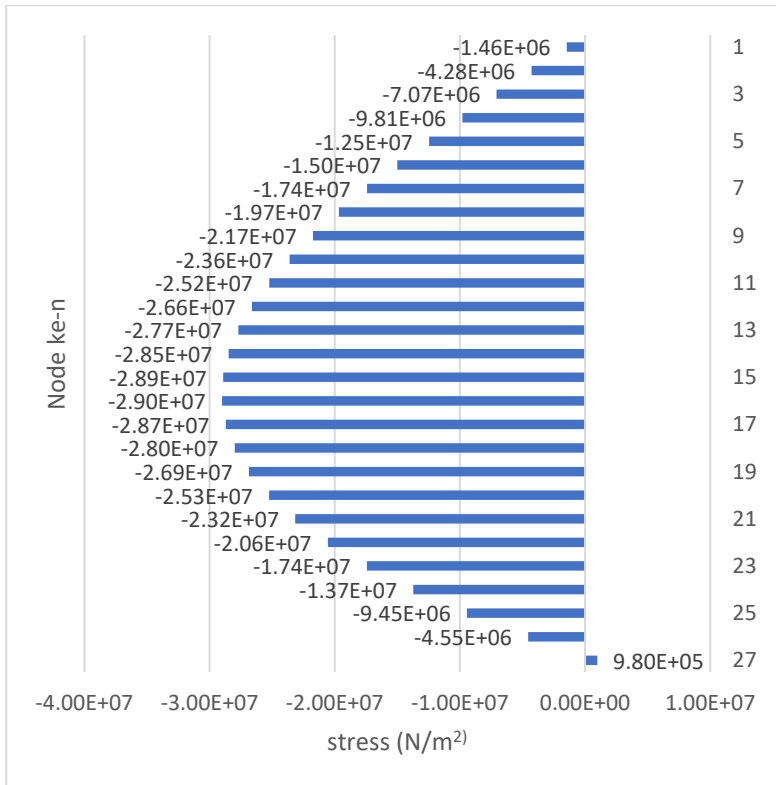
Gambar 4. 82 *Stress Rotasi Drill Pipe Grade Z-140 saat Spudding In*

Gambar 4.82 menunjukkan bahwa *stress* rotasi pada setiap sambungan *drill pipe* saat keadaan *spudding in*. Nilai *stress* rotasi maksimum *drill pipe* berada pada node 2 dengan nilai $1,75 \times 10^8$ N/m².



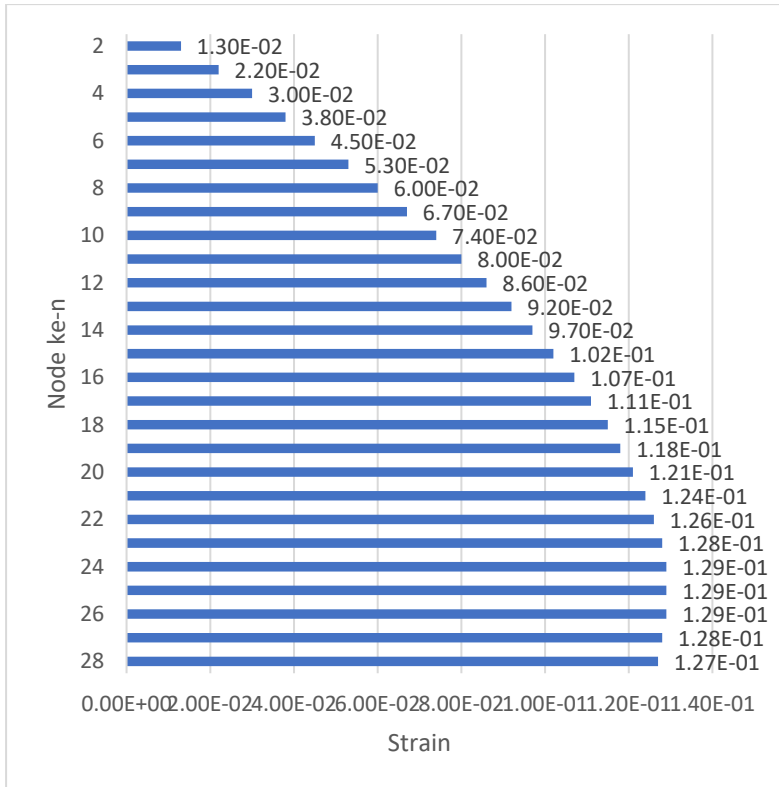
Gambar 4. 83 *Stress Translasi Drill Pipe Grade Z-140 saat Drilling*

Gambar 4.83 menunjukkan bahwa *stress* translasi maksimum pada kondisi *drilling* untuk grade Z-140 berada pada node 27 dengan nilai $-9,68 \times 10^9 \text{ N/m}^2$.



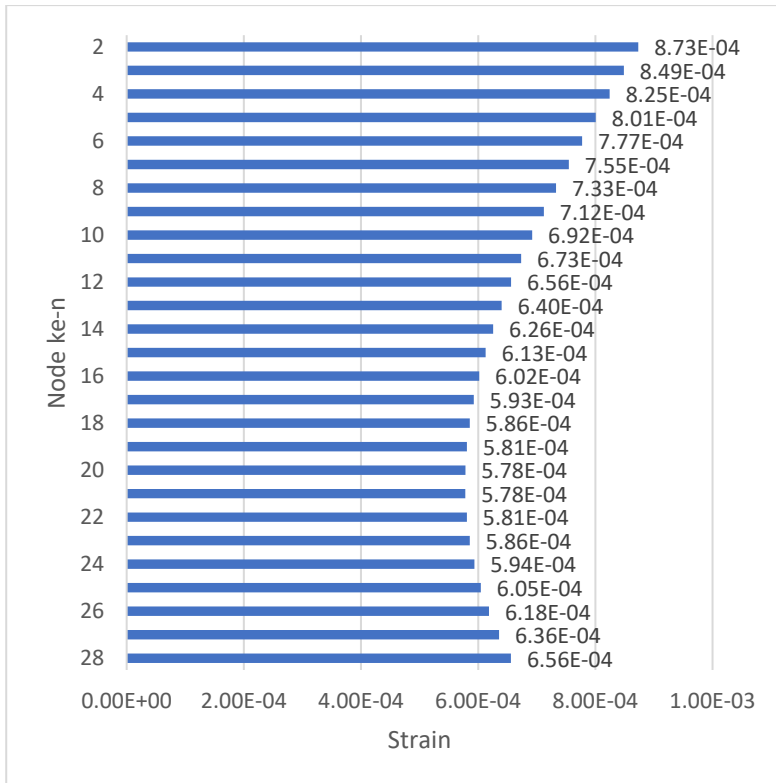
Gambar 4. 84 *Stress Rotasi Drill Pipe Grade Z-140 saat Drilling*

Gambar 4.84 menunjukkan bahwa *stress* rotasi pada setiap sambungan *drill pipe* saat keadaan *drilling* nilainya semakin besar dengan bertambahnya kedalaman air laut, ini terjadi karena pengaruh tekanan air laut yang semakin kedalam semakin besar tekanannya, sehingga gaya yang mengenai *drill pipe* semakin kedalam semakin besar. *Stress* terbesar berada pada node 16 dengan nilai $-2,9 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ dan *stress* terkecil berada pada node 27 sebesar $9,8 \times 10^5 \text{ N/m}^2$.



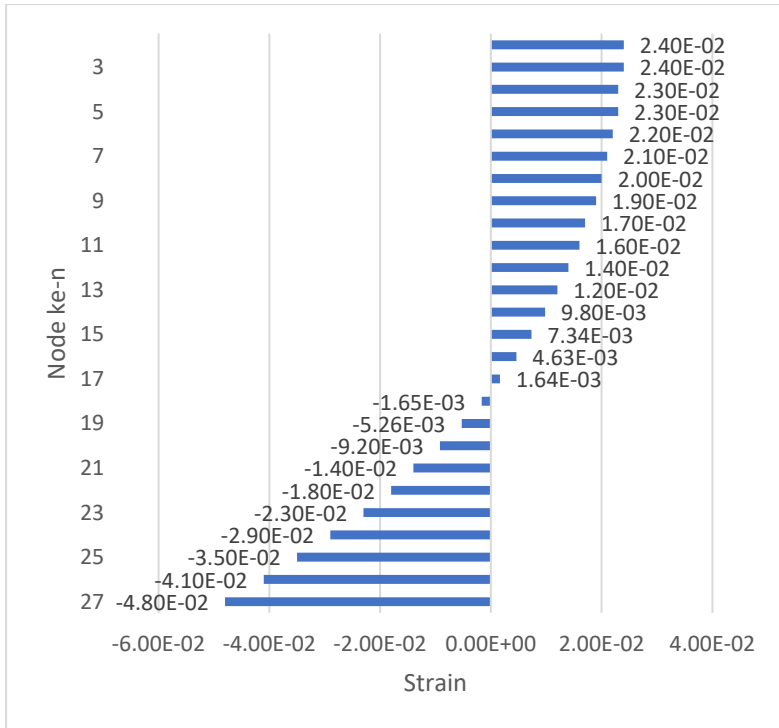
Gambar 4. 85 *Strain Translasi Drill Pipe Grade Z-140 saat Spudding In*

Gambar 4.85 merupakan *strain* translasi pada sambungan *drill pipe* grade Z-104 saat keadaan *spudding in*. Grafik tersebut menunjukkan bahwa *strain drill pipe* saat keadaan *spudding in* semakin kebawah semakin besar, dimana nilai *strain* translasi dari node teratas (node 2) dan node terbawah (node 28) memiliki nilai sebesar 0,013 dan 0,127.



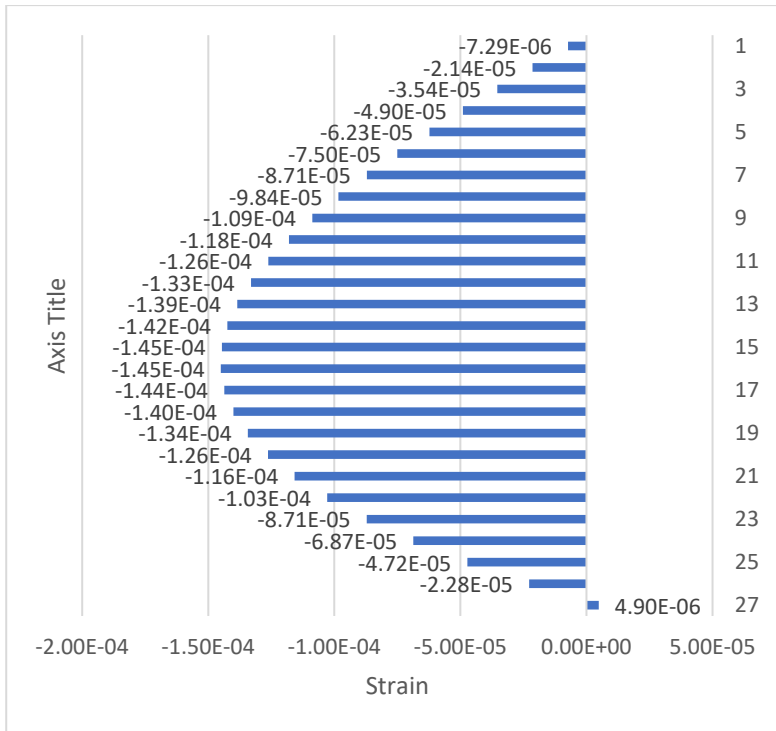
Gambar 4. 86 *Strain Rotasi Drill Pipe Grade Z-140 saat Spudding In*

Gambar 4.86 merupakan *strain* rotasi pada sambungan *drill pipe* grade Z-104 saat keadaan *spudding in*. nilai *strain* rotasi maksimum berada pada node 2 dengan nilai 0,000873.



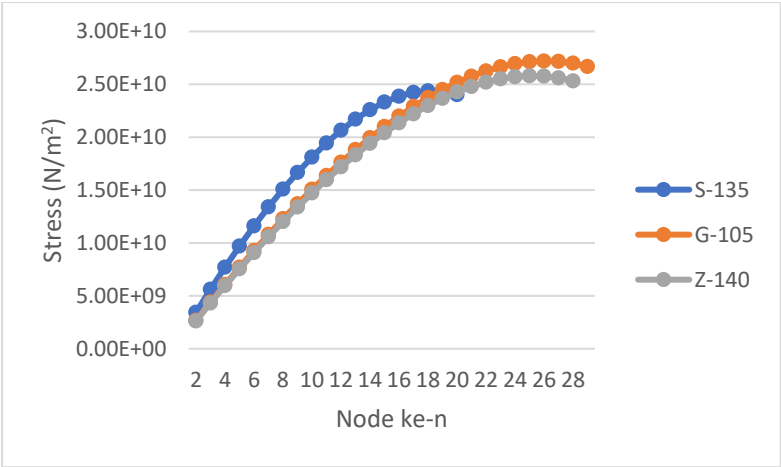
Gambar 4. 87 *Strain Translasi Drill Pipe Grade Z-140 saat Drilling*

Gambar 4.87 merupakan grafik *strain* translasi *drill* pipe dengan grade Z-140 saat keadaan *drilling*. Nilai *strain* translasi maksimum *drill pipe* berada pada node 27 dengan nilai -0,048

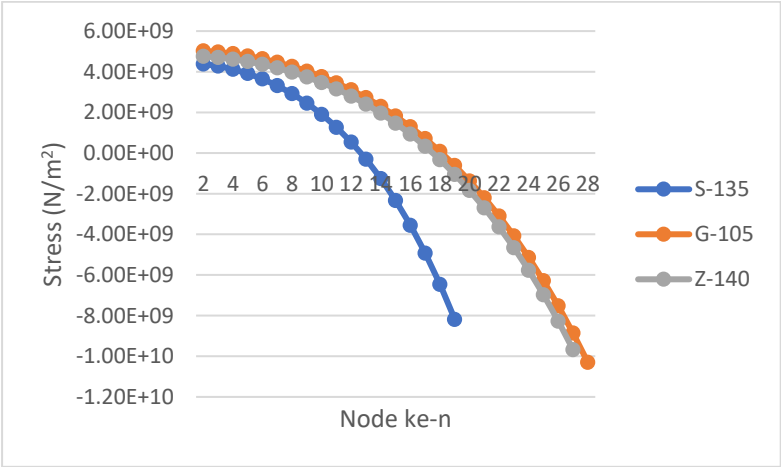


Gambar 4. 88 *Strain Rotatif Drill Pipe Grade Z-140 saat Drilling*

Gambar 4.88 merupakan grafik *strain* rotasi *drill* pipe dengan grade Z-140 saat keadaan *drilling*. Dari grafik tersebut menunjukkan bahwa *strain* rotasi *drill* pipe semakin kebawah semakin membesar, dengan nilai *strain* rotasi terbesar berada pada node 16 dengan nilai -0,000145 sedangkan nilai *strain* translasi terkecil berada pada node ke-1 dengan nilai -0,00000729.



Gambar 4. 89 Perbandingan *Stress* Translasi saat *Spudding In* dengan Variasi Panjang



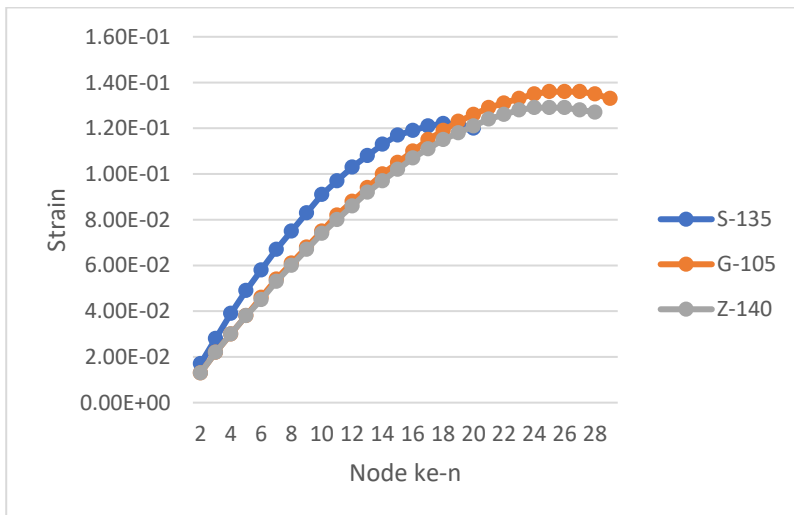
Gambar 4. 90 Perbandingan *Stress* Translasi saat *Drilling* dengan Variasi Panjang

Dari Gambar 4.89 dan Gambar 4.90 dapat dilihat perbandingan *stress* translasi dari variasi panjang. Dari Gambar 4.89 nilai *stress* translasi terbesar terjadi pada *drill pipe* dengan

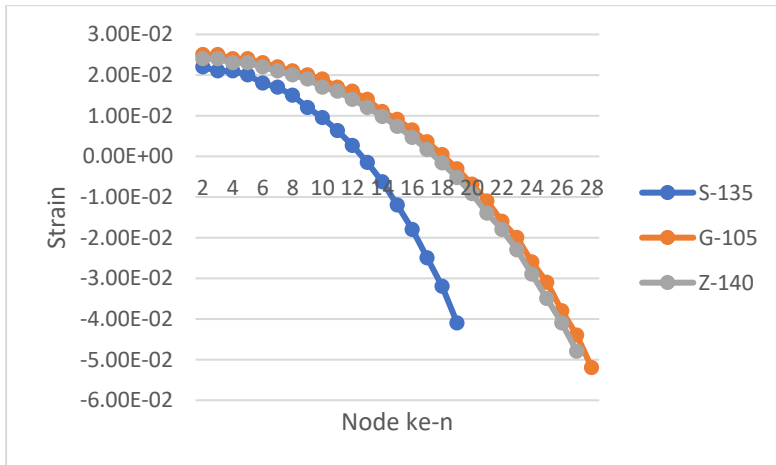
grade G-105 yang memiliki nilai *stress* maksimum *drill pipe* berada pada node 26 dan 27 dengan nilai $2,72 \times 10^{10}$ sedangkan *stress* translasi minimum berada pada node 2 dengan nilai $2,673 \times 10^9$.

Dari Gambar 4.90 *stress* terbesar terjadi pada *drill pipe* dengan grade G-105 dengan nilai *stress* maksimum *drill pipe* berada pada node 28 yaitu $-1,03 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$.

Dari hasil perhitungan dapat dilihat bahwa semakin kecil panjang *drill pipe* maka semakin besar *stress* yang terjadi



Gambar 4. 91 Perbandingan *Strain* Translasi saat *Spudding In* Variasi Panjang



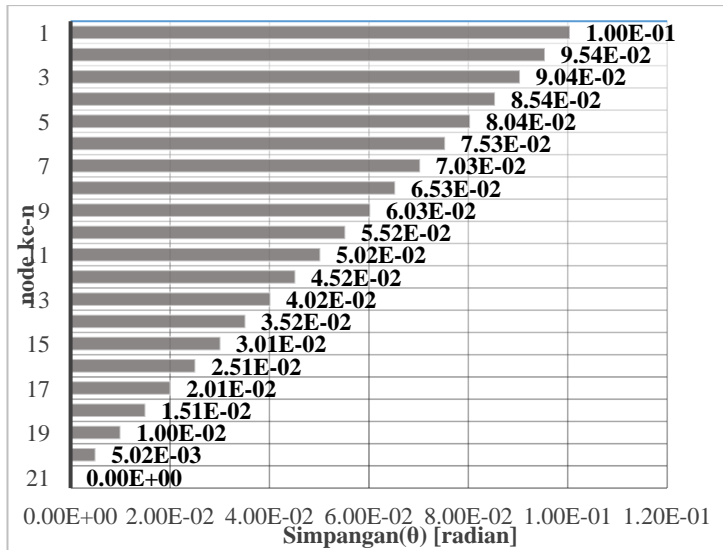
Gambar 4. 92 Perbandingan *Strain* Translasi saat *Drilling* Variasi Panjang

Dari Gambar 4.91 dan Gambar 4.92 dapat dilihat perbandingan *strain* translasi saat *spudding in* maupun *drilling* dari variasi panjang. Dari Gambar 4.91 nilai *strain* translasi saat *spudding in* terbesar terjadi pada *drill pipe* dengan grade G-105 yang memiliki nilai *strain* maksimum *drill pipe* berada pada node 26 dan 27 dengan nilai 0,136 sedangkan *strain* translasi minimum berada pada node 2 dengan nilai 0,013. Dari Gambar 15 *strain* terbesar terjadi pada *drill pipe* dengan grade G-105 dengan nilai *strain* maksimum *drill pipe* berada pada node 28 yaitu -0,052

Dari hasil perhitungan dapat dilihat bahwa semakin kecil panjang *drill pipe* maka semakin besar *strain* yang terjadi.

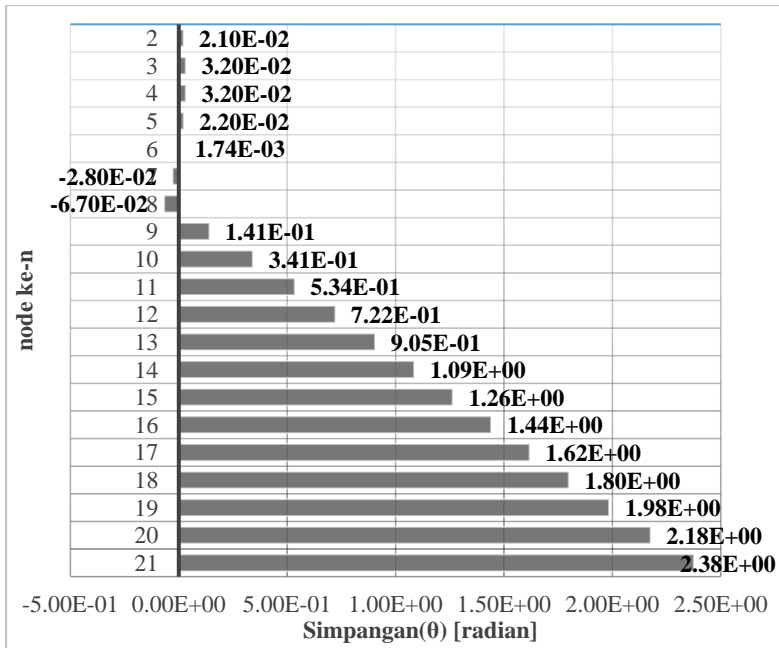
4.3. Perbandingan dengan dan Tanpa Beban Tekanan Air Laut

Untuk mengetahui pengaruh beban tekanan air laut terhadap *drill pipe* maka hasil perhitungan peneliti dibandingkan dengan hasil perhitungan sebelumnya yang telah dilakukan oleh (Herwandinata, 2017).



Gambar 4. 93 Respon Simpangan *drill pipe* Panjang 32 ft bahan *Stainless Steel* Tanpa Tekanan Air Laut

Gambar 4.93 merupakan grafik respon simpangan *drill pipe* dengan bahan *stainless steel* dan dengan panjang pipa 32 ft tanpa pengaruh beban tekanan air laut. Grafik tersebut menunjukkan bahwa respon simpangan *drill pipe* semakin kebawah semakin mengecil, dan respon simpangan terbesar berada pada node 1 yaitu 0,1 radian. *Drill pipe* diberi torsi pada node 1 sebesar 6100 ft-lbs.



Gambar 4. 94 Respon Simpangan *drill pipe* Panjang 32 ft bahan *Stainless Steel* dengan Tekanan Air Laut

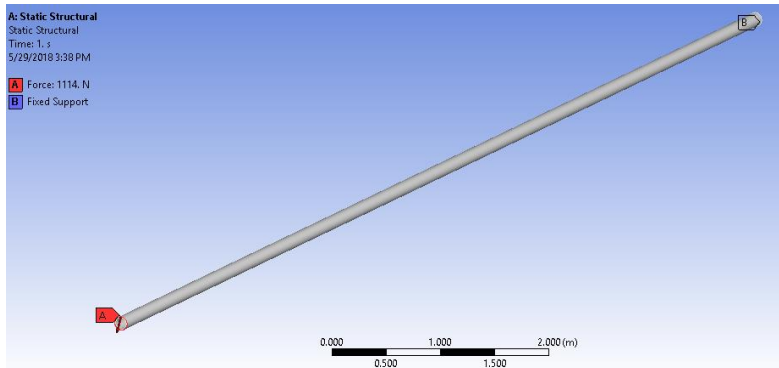
Gambar 4.94 merupakan grafik respon simpangan *drill pipe* dengan bahan *stainless steel* dan dengan panjang pipa 32 ft dipengaruhi tekanan air laut. Grafik tersebut menunjukkan bahwa respon simpangan *drill pipe* semakin kebawah semakin membesar. respon simpangan *drill pipe* terbesar berada pada node 21 dengan nilai 2,38 radian.

Dari Gambar 4.93 dan Gambar 4.94 dapat diketahui pengaruh arus air laut terhadap respon simpangan *drill pipe*. Saat *drill pipe* tidak dikenai gangguan air laut maka beban yang didapat hanya berasal dari torsi saja, sehingga respon simpangan terbesar berada pada node 1. Sedangkan saat *drill pipe* dikenai gaya luar yang berasal dari tekanan air laut maka respon simpangan terbesarnya

berada pada node terakhir yaitu node 20 karena tekanan hidrostatik sendiri semakin kedalam semakin membesar.

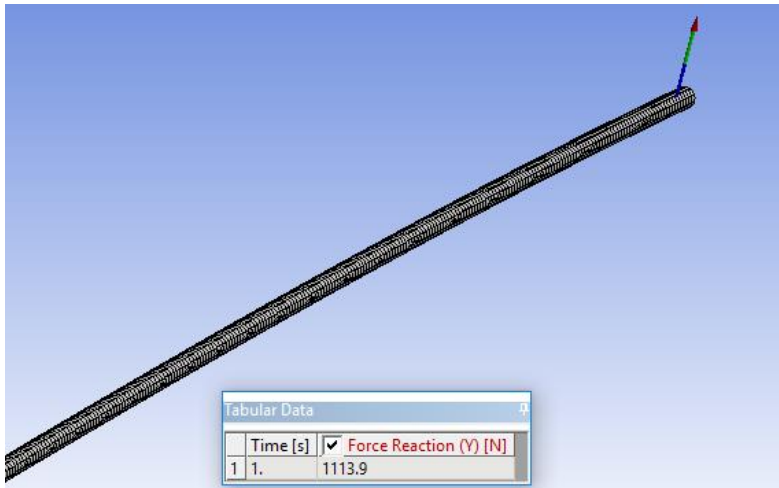
4.4. Verifikasi Hasil

Verifikasi sistem *drill pipe* dilakukan dengan membandingkan hasil matematis (Mathcad) dengan simulasi ANSYS 18. Untuk membandingkannya diambil satu elemen *drill pipe* yang dapat dilihat pada gambar berikut

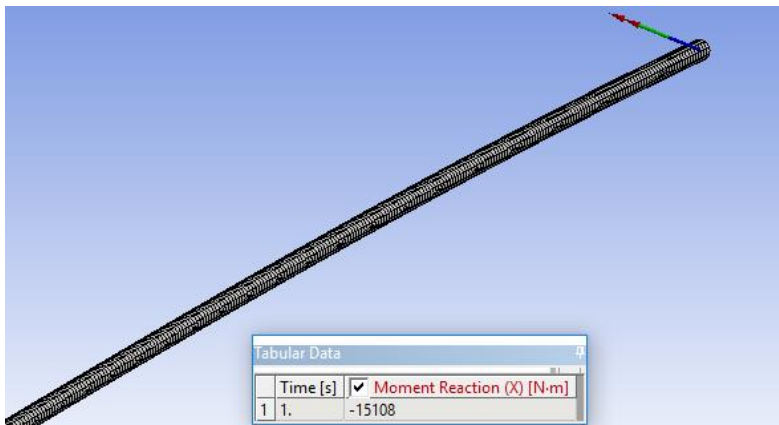


Gambar 4. 95 *Drill Pipe* dengan Satu Elemen

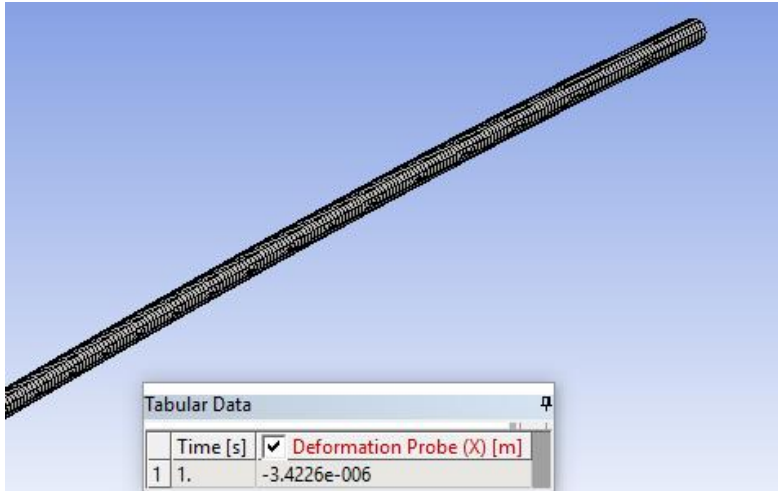
Drill pipe ini memiliki Panjang 13,564 m, diameter dalam 0,108 m dan diameter luar 0,127 m. Node 1 pada sistem di *fixed support* dan *drill pipe* diberi gaya (Y) sebesar 1114 N pada node 2. Modulus Young pada *drill pipe* adalah 210 GPa. Berikut merupakan hasil simulasi ANSYS dari *drill pipe* dengan satu elemen



Gambar 4. 96 Gaya Reaksi Node 1 pada ANSYS



Gambar 4. 97 Momen Reaksi Node 1 pada ANSYS



Gambar 4. 98 *Displacement Node 2 Simulasi ANSYS*

Kemudian hasil simulasi ANSYS tersebut dibandingkan dengan perhitungan matematis yang dapat dilihat sebagai berikut :

$$\begin{pmatrix} Y1 \\ M1 \\ Y2 \\ M2 \end{pmatrix} = \frac{E \cdot I}{L} \begin{pmatrix} \frac{12}{L^2} & \frac{6}{L} & -\frac{12}{L^2} & \frac{6}{L} \\ \frac{6}{L} & 4 & -\frac{6}{L} & 2 \\ -\frac{12}{L^2} & -\frac{6}{L} & \frac{12}{L^2} & -\frac{6}{L} \\ \frac{6}{L} & 2 & -\frac{6}{L} & 4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v1 \\ \theta1 \\ v2 \\ \theta2 \end{pmatrix}$$

Karena node 1 dimatikan, maka $v1$ (perpindahan translasi) dan $\theta1$ (perpindahan rotasi) adalah 0 sehingga baris 1 dan baris 2 dapat diabaikan. Diketahui gaya pada node 2 yaitu $Y2 = -1114 \text{ N}$

$$\begin{pmatrix} -1114 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.247 \times 10^9 & -8.46 \times 10^9 \\ -8.46 \times 10^9 & 7.65 \times 10^{10} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} v2 \\ \theta2 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} v2 \\ \theta2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.247 \times 10^9 & -8.46 \times 10^9 \\ -8.46 \times 10^9 & 7.65 \times 10^{10} \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} -1114 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} v2 \\ \theta2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -3.577 \times 10^{-6} \\ -3.956 \times 10^{-7} \end{pmatrix}$$

Setelah $v2$ dan $\theta2$ diketahui, selanjutnya mencari $Y1$ (gaya) dan $M1$ (momen) dengan memasukkan nilai ke persamaan awal

$$\begin{pmatrix} Y1 \\ M1 \\ -1114 \\ 0 \end{pmatrix} = K \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -3.577 \times 10^{-6} \\ -3.956 \times 10^{-7} \end{pmatrix}$$

Dari hasil perkalian, diperoleh hasil :

$$\begin{pmatrix} Y1 \\ M1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1115.1806186503328921 \\ 15128.669553150432638 \end{pmatrix}$$

Untuk mengetahui seberapa akurat hasil perhitungan terhadap simulasi maka menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$Error = \left| \frac{\text{perhitungan} - \text{simulasi}}{\text{simulasi}} \right| \times 100\%$$

Tabel 4.1 berikut memperlihatkan nilai momen reaksi, gaya reaksi dan *displacement* berdasarkan perhitungan dan simulasi ANSYS

Tabel 4. 1 Perbandingan Nilai Matematis dan Simulasi

Hasil	Metode		Selisih	Error (%)
	Matematis	Simulasi		
V2	$-3,577 \times 10^{-6}$	$-3,4226 \times 10^{-6}$	-1.544×10^{-7}	4,511
Y1	1115,18	1113,9	1,281	0,115
M1	15128,66	15108	20,67	0,137

Tabel 4.1 menunjukkan nilai error dari hasil perhitungan dibandingkan dengan hasil simulasi, dari hasil tersebut nilai error dari deformasi (v2) yang ada pada node 2 sebesar 4,5 %; nilai error gaya reaksi (Y1) pada node 1 sebesar 0,115 % dan momen reaksi (M1) untuk node 1 sebesar 0,137

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisa data, maka dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut :

1. Untuk kedalaman 270 meter, frekuensi natural pada *drill pipe* dengan berdasarkan variasi panjang pipa didapatkan nilai frekuensi natural terkecil yaitu *drill pipe* dengan grade S-135 dengan nilai 4.171 Hz pada node 21 dan berdasarkan variasi diameter pipa didapatkan nilai frekuensi natural terkecil yaitu *drill pipe* dengan grade Z-140 dengan nilai 3.742 Hz pada node 21
2. Pengaruh tekanan air laut merupakan beban merata yang selanjutnya dihitung sebagai beban ekuivalen tiap node dengan gaya $2,276 \times 10^7$ N pada node 10 dan gaya $7,975 \times 10^7$ N pada node 15
3. Nilai *stress* dan *strain drill pipe* terkecil berdasarkan variasi panjang pipa saat *spudding in* terdapat pada *drill pipe* yang mempunyai panjang pipa 44,5 feet yaitu grade S-135 dengan nilai *stress* translasi pada node 20 sebesar $2,401 \times 10^{10}$ dan *strain* translasi pada node 20 sebesar 0,120. Sedangkan nilai *stress* dan *strain* terkecil berdasarkan variasi diameter pipa saat *drilling* terdapat pada *drill pipe* dengan grade V-150 yang memiliki nilai *stress* translasi pada node 20 sebesar $-5,277 \times 10^9$ dan *strain* translasi pada node 20 sebesar -0,026

5.2 Saran

Saran dari penulis untuk kemajuan penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut :

1. Hendaknya pengaruh air laut tidak dihitung secara laminar karena kenyataannya lebih mengarah pada aliran turbulen
2. Mengkaji beban dari internal pipa untuk lebih dapat mendekati kenyataan

DAFTAR PUSTAKA

- Batati, N. A. (2015). *Simulation Of Drill String Vibration Due To Riser's Oscillation At Different Depth, Frequency And Rpm*. Bandar Seri Iskandar, Perak: Universitas Teknologi Petronas.
- Herwandinata, D. (2017). *Analisis Respons Simpangan Drill Pipe Pada Pengeboran Bawah Air*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Hugh D.Young, R. A. (2002). Sears and Zemansky's University Physics. In R. A. Hugh D.Young, *Fisik Universitas* (p. 281). Jakarta: Erlangga.
- International, W. (2017, Desember 13). *specc sheet drill pipe*. Retrieved from Workstring International: http://workstringsinternational.com/equipment/spec_sheet/s/drill_pipe/
- Plisga, W. C. (2005). *Standar Handbook of Petroleum & Natural Gas Engineering*. United States of America: Elsevier.
- Rianti, E. (2018, Februari 13). *OPEC Perkiraan Minyak Dunia Tahun Ini Naik*. Retrieved from market.bisnis.com: <http://market.bisnis.com/read/20180213/94/738158/opec-perkiraan-permintaan-minyak-dunia-tahun-ini-naik>
- Susatio, Y. (2004). *Dasar-Dasar Metode Elemen Hingga*. Yogyakarta: ANDI.
- Susilo, J. (2004). Identifikasi Spesifik Drill Pipe Pada Diklat Operator Pemboran Dengan Mengoptimalkan Sarana Praktek di Pusdiklat Migas. *Forum Teknologi*, 2.
- Sutrisno. (n.d.). *Modul 5 Fluida*. Retrieved januari 30, 2018, from file.upi.edu/Direktori/FPMIPA/.../Modul_5_KEGIATAN_BELAJAR_1.pdf

- T.Thomson, W. (1986). *Teori Getaran Dengan Penerapannya*. Jakarta: Erlangga.
- Wenda, Y. (2012). Desain Rangkaian Pipa Pemboran Pada Laboraturium Simulasi Bor . *Pusdiklat Migas Cepu ISSN 2085-6245*, 67.
- William D.Callister, D. D. (2014). *Fundamentals of Materials Science and Engineering*. Hobeken, NJ: John Wiley & Sons.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Oktafaina dilahirkan di Serang pada tanggal 20 Oktober 1995. Penulis menempuh pendidikan formal di SDN 13 Kota Serang, SMPN 2 Kota Serang, SMAN 2 Kota Serang. Kemudian penulis merantau ke Yogyakarta untuk melanjutkan studi di D3 Elektronika dan Instrumentasi UGM pada tahun 2013. Setelah lulus program Diploma 3, penulis kemudian meneruskan jenjang pendidikan Strata 1 di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Departemen Teknik Fisika pada tahun 2016. Pada tahun 2017 penulis memilih untuk mengambil Tugas Akhir pada bidang Vibrasi dan Akustik. Penulis dapat dihubungi melalui surat elektronik di oktafaina3@gmail.com.

LAMPIRAN

LAMPIRAN A

PERHITUNGAN MATRIKS KEKAKUAN LOKAL

$$L := 13.564 \quad OD := 0.127 \quad ID := 0.108 \quad E := 2 \cdot 10^{11} \quad \rho p := 1.025 \quad g := 9.8 \quad T := 41081.284$$

Mencari momen inersia drill pipe

$$I = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (R1^2 + R2^2) \quad R1 := \frac{ID}{2} = 0.054 \quad R2 := \frac{OD}{2} = 0.064$$

dimana mencari massa drill pipe

$$\rho = \frac{m}{v} \quad \rho := 7850$$

$$v = \pi \cdot R^2 \cdot L \quad v := \pi \cdot (R2^2 - R1^2) \cdot L = 0.048 \quad \text{VOLUME PIPABERONGGA}$$

$$m := \rho \cdot v \quad m = 373.395 \quad \text{massa satu elemen}$$

maka momen inersianya adalah

$$I := \frac{1}{2} \cdot m \cdot (R1^2 + R2^2) \quad I = 1.297$$

mencari luas penampang pipa

$$A := OD \cdot L \quad A = 1.723$$

$$ORIGIN := 1$$

mencari matriks kekakuan elemen 1 berbatas node 1 dan 2

$$i := 1..42 \quad j := 1..42 \quad k1_{i,j} := 0$$

$$K1 := \frac{E \cdot I}{L} \begin{pmatrix} \frac{12}{L^3} & \frac{6}{L} & \frac{-12}{L^3} & \frac{6}{L} \\ \frac{6}{L} & 4 & \frac{-6}{L} & 2 \\ \frac{-12}{L^3} & \frac{6}{L} & \frac{12}{L^3} & \frac{6}{L} \\ \frac{6}{L} & 2 & \frac{-6}{L} & 4 \end{pmatrix}$$

$$k1_{1,1} := K1_{1,1} \quad k1_{1,2} := K1_{1,2} \quad k1_{1,3} := K1_{1,3} \quad k1_{1,4} := K1_{1,4}$$

$$k1_{2,1} := K1_{2,1} \quad k1_{2,2} := K1_{2,2} \quad k1_{2,3} := K1_{2,3} \quad k1_{2,4} := K1_{2,4}$$

$$k1_{3,1} := K1_{3,1} \quad k1_{3,2} := K1_{3,2} \quad k1_{3,3} := K1_{3,3} \quad k1_{3,4} := K1_{3,4}$$

$$k1_{4,1} := K1_{4,1} \quad k1_{4,2} := K1_{4,2} \quad k1_{4,3} := K1_{4,3} \quad k1_{4,4} := K1_{4,4}$$

mencari matriks kekakuan elemen 2 berbatas node 2 dan 3

$$i := 1..42 \quad j := 1..42 \quad k2_{i,j} := 0$$

$$K2 := \frac{E \cdot I}{L} \begin{pmatrix} \frac{12}{L^2} & \frac{6}{L} & \frac{-12}{L^2} & \frac{6}{L} \\ \frac{6}{L} & 4 & \frac{-6}{L} & 2 \\ \frac{-12}{L^2} & \frac{-6}{L} & \frac{12}{L^2} & \frac{-6}{L} \\ \frac{6}{L} & 2 & \frac{-6}{L} & 4 \end{pmatrix}$$

$$k2_{3,3} := K2_{1,1} \quad k2_{3,4} := K2_{1,2} \quad k2_{3,5} := K2_{1,3} \quad k2_{3,6} := K2_{1,4}$$

$$k2_{4,3} := K2_{2,1} \quad k2_{4,4} := K2_{2,2} \quad k2_{4,5} := K2_{2,3} \quad k2_{4,6} := K2_{2,4}$$

$$k2_{5,3} := K2_{3,1} \quad k2_{5,4} := K2_{3,2} \quad k2_{5,5} := K2_{3,3} \quad k2_{5,6} := K2_{3,4}$$

$$k2_{6,3} := K2_{4,1} \quad k2_{6,4} := K2_{4,2} \quad k2_{6,5} := K2_{4,3} \quad k2_{6,6} := K2_{4,4}$$

mencari matriks kekakuan elemen 3 berbatas node 3 dan 4

$$i := 1..42 \quad j := 1..42 \quad k3_{i,j} := 0$$

$$K3 := \frac{E \cdot I}{L} \begin{pmatrix} \frac{12}{L^2} & \frac{6}{L} & \frac{-12}{L^2} & \frac{6}{L} \\ \frac{6}{L} & 4 & \frac{-6}{L} & 2 \\ \frac{-12}{L^2} & \frac{-6}{L} & \frac{12}{L^2} & \frac{-6}{L} \\ \frac{6}{L} & 2 & \frac{-6}{L} & 4 \end{pmatrix}$$

$$k3_{5,5} := K3_{1,1} \quad k3_{5,6} := K3_{1,2} \quad k3_{5,7} := K3_{1,3} \quad k3_{5,8} := K3_{1,4}$$

$$k3_{6,5} := K3_{2,1} \quad k3_{6,6} := K3_{2,2} \quad k3_{6,7} := K3_{2,3} \quad k3_{6,8} := K3_{2,4}$$

$$k3_{7,5} := K3_{3,1} \quad k3_{7,6} := K3_{3,2} \quad k3_{7,7} := K3_{3,3} \quad k3_{7,8} := K3_{3,4}$$

$$k3_{8,5} := K3_{4,1} \quad k3_{8,6} := K3_{4,2} \quad k3_{8,7} := K3_{4,3} \quad k3_{8,8} := K3_{4,4}$$

LAMPIRAN B

PERHITUNGAN MATRIKS KEKAKUAN GLOBAL, GAYA DAN MOMEN

$$K_{\text{MM}} := k1 + k2 + k3 + k4 + k5 + k6 + k7 + k8 + k9 + k10 + k11 + k12 + k13 + k14 + k15 + k16 + k17 +$$

	1	2	3	4	5
1	$1.248 \cdot 10^9$	$8.461 \cdot 10^9$	$-1.248 \cdot 10^9$	$8.461 \cdot 10^9$	0
2	$8.461 \cdot 10^9$	$7.651 \cdot 10^{10}$	$-8.461 \cdot 10^9$	$3.825 \cdot 10^{10}$	0
3	$-1.248 \cdot 10^9$	$-8.461 \cdot 10^9$	$2.495 \cdot 10^9$	0	$-1.248 \cdot 10^9$
4	$8.461 \cdot 10^9$	$3.825 \cdot 10^{10}$	0	$1.53 \cdot 10^{11}$	$-8.461 \cdot 10^9$
5	0	0	$-1.248 \cdot 10^9$	$-8.461 \cdot 10^9$	$2.495 \cdot 10^9$
6	0	0	$8.461 \cdot 10^9$	$3.825 \cdot 10^{10}$	0
7	0	0	0	0	$-1.248 \cdot 10^9$
8	0	0	0	0	$8.461 \cdot 10^9$
9	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	...

mencari gaya eksternal yang mengenai pipa

$$P(x) := \rho p \cdot g \cdot x$$

$$F(x) := P(x) \cdot A$$

$$p = \frac{F}{A}$$

elemen 1

$$Y1_{\text{MM}} := \int_0^L F(x) \cdot \left(\frac{2 \cdot x^3}{L^3} - \frac{3 \cdot x^2}{L^2} + 1 \right) dx \quad Y1 = 477.538$$

$$M1 := \int_0^L F(x) \cdot \left(x - \frac{2 \cdot x^2}{L} + \frac{x^3}{L^2} \right) dx \quad M1 = 1.439 \times 10^3$$

$$Y2a := \int_0^L F(x) \cdot \left(\frac{3 \cdot x^2}{L^2} - \frac{2 \cdot x^3}{L^3} \right) dx \quad Y2a = 1.114 \times 10^3$$

$$M2a := \int_0^L F(x) \cdot \left(\frac{x^3}{L^2} - \frac{x^2}{L} \right) dx \quad M2a = -2.159 \times 10^3$$

Gaya dan Momen dihitung sampai 20 elemen untuk variasi diameter dan 27 elemen, 28 elemen untuk variasi panjang

LAMPIRAN C

PERHITUNGAN GAYA TOTAL DAN *DISPLACEMENT*

Mencari Matriks Gaya Total

$$Y_{tot} = F1 + F2 + F3 + F4 + F5 + F6 + F7 + F8 + F9 + F10 + F11 + F12 + F13 + F14 + F15 + F16 + F1$$

$Y_{tot} =$

	1
1	477.538
2	$4.252 \cdot 10^4$
3	$9.551 \cdot 10^3$
4	$4.246 \cdot 10^4$
5	$1.178 \cdot 10^5$
6	$7.982 \cdot 10^5$
7	$4.744 \cdot 10^5$
8	$4.62 \cdot 10^6$
9	$1.232 \cdot 10^6$
10	$1.591 \cdot 10^7$
11	$2.544 \cdot 10^6$
12	$4.115 \cdot 10^7$
13	$4.562 \cdot 10^6$
14	$8.889 \cdot 10^7$
15	$7.44 \cdot 10^6$
16	...

Mencari displacement

$$Y = K \cdot d$$

$$Y_{spud} = \text{submatrix}(Y_{tot}, 3, 42, 1, 1)$$

$Y_{spud} =$

	1
1	$9.551 \cdot 10^3$
2	$4.246 \cdot 10^4$
3	$1.178 \cdot 10^5$
4	$7.982 \cdot 10^5$
5	$4.744 \cdot 10^5$
6	$4.62 \cdot 10^6$
7	$1.232 \cdot 10^6$
8	$1.591 \cdot 10^7$
9	$2.544 \cdot 10^6$
10	$4.115 \cdot 10^7$
11	$4.562 \cdot 10^6$
12	$8.889 \cdot 10^7$
13	$7.44 \cdot 10^6$
14	$1.697 \cdot 10^8$
15	$1.133 \cdot 10^7$
16	...

Y_{spud} merupakan gaya yang mengenai *drill pipe* saat keadaan *squidding in*

LAMPIRAN D

PERHITUNGAN STRAIN DAN STRESS

luas penampang silinder berongga

$$A_a := \frac{\pi}{4} (OD^2 - ID^2) \quad A_a = 3.507 \times 10^{-3}$$

stress dan strain translasi

$$\begin{aligned} \epsilon_1 &:= \frac{d_3 - d_1}{L} = 0.017 & \epsilon_5 &:= \frac{d_{11} - d_9}{L} = 0.058 & \epsilon_9 &:= \frac{d_{19} - d_{17}}{L} = 0.091 \\ \epsilon_2 &:= \frac{d_5 - d_3}{L} = 0.028 & \epsilon_6 &:= \frac{d_{13} - d_{11}}{L} = 0.067 & \epsilon_{10} &:= \frac{d_{21} - d_{19}}{L} = 0.097 \\ \epsilon_3 &:= \frac{d_7 - d_5}{L} = 0.039 & \epsilon_7 &:= \frac{d_{15} - d_{13}}{L} = 0.075 & \epsilon_{11} &:= \frac{d_{23} - d_{21}}{L} = 0.103 \\ \epsilon_4 &:= \frac{d_9 - d_7}{L} = 0.049 & \epsilon_8 &:= \frac{d_{17} - d_{15}}{L} = 0.083 & \epsilon_{12} &:= \frac{d_{25} - d_{23}}{L} = 0.108 \\ \epsilon_{13} &:= \frac{d_{27} - d_{25}}{L} = 0.113 & \epsilon_{17} &:= \frac{d_{35} - d_{33}}{L} = 0.122 \\ \epsilon_{14} &:= \frac{d_{29} - d_{27}}{L} = 0.117 & \epsilon_{18} &:= \frac{d_{37} - d_{35}}{L} = 0.122 \\ \epsilon_{15} &:= \frac{d_{31} - d_{29}}{L} = 0.119 & \epsilon_{19} &:= \frac{d_{39} - d_{37}}{L} = 0.12 \\ \epsilon_{16} &:= \frac{d_{33} - d_{31}}{L} = 0.121 \end{aligned}$$

stress rotatif

$$\begin{aligned} \epsilon_{20} &:= \frac{d_4 - d_2}{L} = 8.209 \times 10^{-4} & \epsilon_{24} &:= \frac{d_{12} - d_{10}}{L} = 6.957 \times 10^{-4} & \epsilon_{28} &:= \frac{d_{20} - d_{18}}{L} = 5.985 \times 10^{-4} \\ \epsilon_{21} &:= \frac{d_6 - d_4}{L} = 7.882 \times 10^{-4} & \epsilon_{25} &:= \frac{d_{14} - d_{12}}{L} = 6.68 \times 10^{-4} & \epsilon_{29} &:= \frac{d_{22} - d_{20}}{L} = 5.81 \times 10^{-4} \\ \epsilon_{22} &:= \frac{d_8 - d_6}{L} = 7.562 \times 10^{-4} & \epsilon_{26} &:= \frac{d_{16} - d_{14}}{L} = 6.423 \times 10^{-4} & \epsilon_{30} &:= \frac{d_{24} - d_{22}}{L} = 5.67 \times 10^{-4} \\ \epsilon_{23} &:= \frac{d_{10} - d_8}{L} = 7.252 \times 10^{-4} & \epsilon_{27} &:= \frac{d_{18} - d_{16}}{L} = 6.19 \times 10^{-4} & \epsilon_{31} &:= \frac{d_{26} - d_{24}}{L} = 5.567 \times 10^{-4} \\ \epsilon_{32} &:= \frac{d_{28} - d_{26}}{L} = 5.505 \times 10^{-4} & \epsilon_{36} &:= \frac{d_{36} - d_{34}}{L} = 5.731 \times 10^{-4} \\ \epsilon_{33} &:= \frac{d_{30} - d_{28}}{L} = 5.487 \times 10^{-4} & \epsilon_{37} &:= \frac{d_{38} - d_{36}}{L} = 5.922 \times 10^{-4} \\ \epsilon_{34} &:= \frac{d_{32} - d_{30}}{L} = 5.516 \times 10^{-4} & \epsilon_{38} &:= \frac{d_{40} - d_{38}}{L} = 6.175 \times 10^{-4} \\ \epsilon_{35} &:= \frac{d_{34} - d_{32}}{L} = 5.596 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

$$\varepsilon_{\text{spud}} := \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \\ \varepsilon_7 \\ \varepsilon_8 \\ \varepsilon_9 \\ \varepsilon_{10} \\ \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{14} \\ \varepsilon_{15} \\ \varepsilon_{16} \\ \varepsilon_{17} \\ \varepsilon_{18} \\ \varepsilon_{19} \end{pmatrix}$$

	1
1	0.017
2	0.028
3	0.039
4	0.049
5	0.058
6	0.067
7	0.075
8	0.083
9	0.091
10	0.097
11	0.103
12	0.108
13	0.113
14	0.117
15	0.119
16	...

$$\sigma_{\text{spud}} := E \cdot \varepsilon_{\text{spud}}$$

	1
1	$3.438 \cdot 10^9$
2	$5.619 \cdot 10^9$
3	$7.708 \cdot 10^9$
4	$9.703 \cdot 10^9$
5	$1.16 \cdot 10^{10}$
6	$1.34 \cdot 10^{10}$
7	$1.509 \cdot 10^{10}$
8	$1.666 \cdot 10^{10}$
9	$1.812 \cdot 10^{10}$
10	$1.945 \cdot 10^{10}$
11	$2.065 \cdot 10^{10}$
12	$2.17 \cdot 10^{10}$
13	$2.259 \cdot 10^{10}$
14	$2.332 \cdot 10^{10}$
15	$2.387 \cdot 10^{10}$
16	...

LAMPIRAN E

PERHITUNGAN FREKUENSI NATURAL

mencari matriks kekakuan elemen 1 berbatas node 1 dan 2

$$i := 1 \dots 42 \quad j := 1 \dots 42 \quad m1_{i,j} := 0$$

$$M1 := \frac{\rho \cdot Ab \cdot L}{420} \cdot \begin{pmatrix} 156 & 22 \cdot L & 54 & -13 \cdot L \\ 22 \cdot L & 4 \cdot L^2 & 13 \cdot L & -3 \cdot L^2 \\ 54 & 13 \cdot L & 156 & -22 \cdot L \\ -13 \cdot L & -3 \cdot L^2 & -22 \cdot L & 4 \cdot L^2 \end{pmatrix}$$

$$m1_{1,1} := M1_{1,1} \quad m1_{1,2} := M1_{1,2} \quad m1_{1,3} := M1_{1,3} \quad m1_{1,4} := M1_{1,4}$$

$$m1_{2,1} := M1_{2,1} \quad m1_{2,2} := M1_{2,2} \quad m1_{2,3} := M1_{2,3} \quad m1_{2,4} := M1_{2,4}$$

$$m1_{3,1} := M1_{3,1} \quad m1_{3,2} := M1_{3,2} \quad m1_{3,3} := M1_{3,3} \quad m1_{3,4} := M1_{3,4}$$

$$m1_{4,1} := M1_{4,1} \quad m1_{4,2} := M1_{4,2} \quad m1_{4,3} := M1_{4,3} \quad m1_{4,4} := M1_{4,4}$$

mencari matriks kekakuan elemen 2 berbatas node 2 dan 3

$$i := 1 \dots 42 \quad j := 1 \dots 42 \quad m2_{i,j} := 0$$

$$M2 := \frac{\rho \cdot Ab \cdot L}{420} \cdot \begin{pmatrix} 156 & 22 \cdot L & 54 & -13 \cdot L \\ 22 \cdot L & 4 \cdot L^2 & 13 \cdot L & -3 \cdot L^2 \\ 54 & 13 \cdot L & 156 & -22 \cdot L \\ -13 \cdot L & -3 \cdot L^2 & -22 \cdot L & 4 \cdot L^2 \end{pmatrix}$$

$$m2_{3,3} := M2_{1,1} \quad m2_{3,4} := M2_{1,2} \quad m2_{3,5} := M2_{1,3} \quad m2_{3,6} := M2_{1,4}$$

$$m2_{4,3} := M2_{2,1} \quad m2_{4,4} := M2_{2,2} \quad m2_{4,5} := M2_{2,3} \quad m2_{4,6} := M2_{2,4}$$

$$m2_{5,3} := M2_{3,1} \quad m2_{5,4} := M2_{3,2} \quad m2_{5,5} := M2_{3,3} \quad m2_{5,6} := M2_{3,4}$$

$$m2_{6,3} := M2_{4,1} \quad m2_{6,4} := M2_{4,2} \quad m2_{6,5} := M2_{4,3} \quad m2_{6,6} := M2_{4,4}$$

Matriks dihitung sebanyak 20 elemen, 27 elemen dan 28 elemen

$MM := \text{submatrix}(M, 3, 42, 3, 42)$

$KK := \text{submatrix}(K, 3, 42, 3, 42)$

$AA := MM^{-1} \cdot KK$

$\text{eigenvals}(AA) =$

	1
1	$9.983 \cdot 10^8$
2	$6.869 \cdot 10^8$
3	$6.464 \cdot 10^8$
4	$5.883 \cdot 10^8$
5	$5.217 \cdot 10^8$
6	$4.539 \cdot 10^8$
7	$3.895 \cdot 10^8$
8	$3.311 \cdot 10^8$
9	$2.795 \cdot 10^8$
10	$2.349 \cdot 10^8$
11	$1.967 \cdot 10^8$
12	$1.643 \cdot 10^8$
13	$1.369 \cdot 10^8$
14	$1.137 \cdot 10^8$
15	$9.424 \cdot 10^7$
16	...

$$\omega n := \text{sort}(\sqrt{\text{eigenvals}(AA)})$$

$$f_n := \frac{\omega n}{2\pi}$$

$f_n =$

	1
1	0.738
2	4.626
3	12.954
4	25.385
5	41.968
6	62.705
7	87.611
8	116.705
9	150.02
10	187.602
11	229.514
12	275.837
13	326.671
14	382.136
15	442.357
16	...

$\omega n =$

	1
1	4.638
2	29.067
3	81.39
4	159.498
5	263.69
6	393.989
7	550.474
8	733.277
9	942.601
10	$1.179 \cdot 10^3$
11	$1.442 \cdot 10^3$
12	$1.733 \cdot 10^3$
13	$2.053 \cdot 10^3$
14	$2.401 \cdot 10^3$
15	$2.779 \cdot 10^3$
16	...